VAN DE REDACTIE

Dit is al weer het laatste nummer van deze jaargang van dit Tijdschrift en, zoals gebruikelijk, is dit een speciaal nummer, gewijd aan samenvattingen van proefschriften. Het betreft de proefschriften op het gebied van de elektronica, telecommunicatie en informatieverwerking die in het voorgaande cursusjaar aan de drie Technische Universiteiten in Nederland verschenen.

Voor de overzichtelijkheid zijn de samenvattingen geordend per Universiteit en is er een indeling naar onderwerpen gemaakt.

U treft ook weer de interviews aan die we hebben gehouden met twee promovendi. Eén van de interviews hielden we met een onderzoeker die begin volgend jaar gaat promoveren. Het persoonlijke verhaal achter het proefschrift blijkt vaak verrassend; het laat ook zien dat een onderzoeker die op weg is naar het begeerde eindresultaat er soms aan twijfelt of hij wel op de goede weg is. Hoewel men kan zeggen dat dit het lot van de ware onderzoeker is, doet dit ook de vraag rijzen of er ook onderzoekers zijn die onderweg afhaken.

Wij hopen met deze uitgave tegemoet te komen aan de wensen van onze lezers. Uw reakties zijn zeer welkom evenals eventuele suggesties voor verbeteringen.

Wanneer u geïnteresseerd bent in een proefschrift kunt u dat inzien bij de bibliotheek van de betreffende universiteit. Vaak kunt u daar ook een eigen exemplaar van het proefschrift verkrijgen, na het indienen van een schriftelijk verzoek. Onderstaand vindt u de adressen.

Centrale Bibliotheek TUD
Afdeling Perodieken en Ruil
Schuttersveld 2
2611 WE DELFT

Centrale Bibliotheek TUE
Postbus 513
5600 MB EINDHOVEN

Bureau Universiteitsbibliotheek Twente
Postbus 217
7500 AE ENSCHEDE

TELECOMMUNICATIE

INTERFERENCE IN SATELLITE NAVIGATION AND MOBILE COMMUNICATION

D.J. Moelker
24 november 1998
Promotor: prof.dr.ir. D. van Willigen

Zowel radionavigatie als -communicatie ondervinden druk van andere gebruikers van het radiospectrum. Het succes van mobiele communicatie is hiervan de belangrijkste oorzaak. Een van de consequenties is, dat systemen steeds meer door andere systemen worden beïnvloed. Het doel van dit proefschrift is de effecten van deze interferentie in een model weer te geven en technieken te ontwikkelen om interferentie te bestrijden.

In hoofdstuk 3 voorziet dit proefschrift in synchronisatiemodellen voor *direct sequence spread spectrum* navigatie- en communicatiesystemen die aan interferentie zijn blootgesteld. Deze modellen laten zien dat met eenvoudige middelen als adaptieve A/D omzetters met slechts drie quantisatieniveau's, constante amplitude interferentie gecombineerd met Gaussische ruis kan worden onderdrukt tot een niveau dat dicht bij de theoretische grens ligt.

De tweede modelstudie wordt gegeven in hoofdstuk 4 en heeft betrekking op coëxistentie van TDMA en CDMA in mobiele communicatie. De aanleiding tot dit onderzoek is het succes van GSM, een systeem dat onherroepelijk steeds meer te lijden zal hebben van de capaciteitsproblemen die door haar eigen succes worden veroorzaakt. De GSM-frequentieband, of die van een willekeurig ander mobiel communicatiesysteem, wordt niet tot de theoretische maximale capaciteit benut. Dit opent mogelijkheden voor een breedbandige *overlay* door bijvoorbeeld een CDMA-systeem. Indien goed ontworpen, kan dit in zowel een grotere capaciteit als in nieuwe breedbandige diensten resulteren. De nieuwe invalshoek van de aangereikte modellen is dat veel praktische beperkingen en fenomenen alle tegelijkertijd in het coëxistentiemodel worden opgenomen: imperfecte sectorisatie, shadow fading, imperfecte power control, imperfecte notch filters en de propagatieverliesfactor.

Een overzicht van algemene interferentiebestrijdingstechnieken wordt in hoofdstuk 5 gepresenteerd. Het overzicht van amplitude-domeintechnieken omvat de A/D omzetters uit hoofdstuk 3, een nieuwe optimale niet-lineaire transformatie en een techniek die werkt op de amplitude van de gecombineerde in-fase en quadratuursignalen. Vooral de laatste techniek presteert uitstekend. Nadat het bestrijden van interferentie in het tijd-, spatiële en polarisatiedomein aan de orde is geweest, gaat hoofdstuk 5 verder met de toepassing van interferentiebestrijding voor satellietnavigatie. Centraal staan het behoud van de gewenste signalen en nauwkeurige fase- en afstandmetingen.

De structuren voor interferentiebestrijding die worden ontwikkeld en besproken in hoofdstuk 6, kunnen het optimale behoud van de continuïteit garanderen. Dit is vooral belangrijk voor navigatiesystemen waar continuïteit een stringente eis is. De garantie van effectieve eliminatie van alle soorten interferentie kan alleen worden gegeven als domeinen worden samengevoegd. Dit impliceert met name de combinatie van het tijd- en spatiële domein. De toepassing van op nauwkeurigheid gebaseerde optimalisatiecriteria op satellietnavigatie blijkt beter te werken dan algemene criteria als minimum mean square error en power inversion. Het uitbreiden van de voorgestelde methodologie naar multipad wordt door fundamentele verschillen tussen interferentie en multipad bemoeilijkt. In stationaire toepassingen wordt overigens wel aangetoond dat het bestrijden van multipad en het doen van nauwkeurige richtingsbepaling naar reflectoren met het voorgestelde concept mogelijk zijn.

ON WIDE AREA NETWORKING VIA ATM OVER Ka-BAND SATCOM WITH CDMA

J.R. Farserotu
1 december 1998
Promotor: prof.dr. J.C. Arnbak

(Preface) Information services are becoming more bandwidth intensive and traffic is rapidly increasing on the Internet. Most users of the World Wide Web (WWW), if not all, have experienced delays due to traffic congestion at one time or another. Long delays may be simply an inconvenience to individual home users, but they may cost time and money to a business. The

demand for more bandwidth and more efficient use of existing capacity is steadily growing.

Satellite communication (SATCOM) can provide wide area coverage, which makes it well suited to facilitate the implementation of wide area networks (WANs). SATCOM can be employed to provide connectivity where the terrestrial infrastructure is thin or lacking, as well as, to enhance user mobility over large geographic regions.

ATM is rapidly emerging as the backbone of future information networks. It is designed to support high speed, high bandwidth communication, on-demand. The combination of ATM over SATCOM is a logical extension of technologies for supporting broadband services over WANs. However, questions remain concerning how to effectively combine ATM and SATCOM, such as, ATM-SATCOM integration, resource allocation and management, the ability to achieve and maintain the desired quality of service and the overall efficiency.

CONSTRAINT MANAGEMENT AND TRANSFORMATIONS

B.G. Arsintescu
30 november 1998
Promotors: prof.dr.ir. R.H.J.M. Otten
prof.dr.ir. P.M. Dewilde

Het ontwerp van een moderne geïntegreerde schakeling bestaat uit een reeks van grotendeels geautomatiseerde transformaties, die vanuit een conceptuele specificatie een volledige maskerset voor de fabricage produceert. Elke transformatieslag brengt het ontwerp van het ene "ontwerpniveau" op het andere, en op elk van die niveaus heeft men een reeks van parameters die de *randvoorwaarden* vastleggen waarmee men wil zekerstellen dat het eindresultaat aan de bedoelingen voldoet. Op deze wijze worden specificaties op hogere niveaus omgezet in randvoorwaarden voor synthese, die op hun beurt weer de elektronische eigenschappen van de basisschakelingen en componenten vast moeten leggen. In het Engels heten deze randvoorwaarden *constraints* en de methodologie om te zorgen dat randvoorwaarden op lagere niveaus garanderen dat aan die van hogere niveaus voldaan is, heet *constraint management*. Dit proefschrift presenteert een voorstel om zo'n management systeem op te zetten.

Hiertoe wordt het concept van randvoorwaarden zodanig gegeneraliseerd dat het over het gehele ontwerptraject kan worden toegepast en als het ware zorgdraagt voor de propagatie van de bedoelingen van de ontwerper, van de gedragsspecificatie tot aan de maskers voor de ic-fabricage. Om de verschillende abstractieniveaus voor ontwerpspecificatie te overbruggen zijn modellen voor het transformeren van randvoorwaarden nodig (*constraint trans-formation*). Deze zijn ingebouwd in de architectuur van de constraint manager. Dit wordt mogelijk gemaakt door het beperken van de ruimte die de randvoorwaarden toelaten. Verder wordt elk abstractieniveau voorzien van objectieve verificatiemethoden gekoppeld aan de afleiding van de nieuwe randvoorwaarden.

De geldigheid van deze aanpak wordt getoond met een aantal voorbeelden van de benodigde stappen. Ontwerptechnieken voor digitale schakelingen die door randvoorwaarden gedreven worden, zijn zo samengevat dat hun inpassing in de voorgestelde methodologie blijkt. Om ook de toepasbaarheid voor ontwerpen van systemen die zowel digitale als analoge signaalformaten bewerken bevat dit proefschrift ook methoden

voor transformatie, reductie en generatie voor analoge toepassingen. Op deze manier wordt een efficiënt ontwerptraject voor complexe, prestatiegevoelige schakelingen bereikt.

Om de door systems-on-chip-eisen genoodzaakte verschuiving in ontwerpautomatisering te verwezenlijken introduceert dit proefschrift de volgende concepten:

1. Consistent gebruik van randvoorwaarden Geïntegreerde schakelingen groeien nog steeds in oppervlak, prestaties en functionaliteit. Hierdoor worden steeds meer halfgeleidereffecten merkbaar. Dit leidt tot het dilemma dat steeds eenvoudiger modellering vereist is om de complexiteit van de ontwerp- en analysegereedschappen acceptabel te maken, terwijl steeds meer details in modellering van halfgeleidercomponenten nodig zijn om tot een realistische besluitvorming te komen. In dit proefschrift is daarom voor een benadering gekozen die zich door randvoorwaarden laat leiden. Op deze manier kan elk niveau met de eigen specifieke aspecten van randvoorwaarden rekening houden, vanaf de variaties op gedragsniveau tot aan de niet-idealiteiten op componentniveau.

Constraint-driven design maakt een snel en betrouwbaar traject naar maskerspecificatie vanaf een goed nominaal ontwerp mogelijk, waarbij de bedoelingen van de ontwerper behouden blijven door top-down-transformaties en bottom-up-verificaties. Op deze wijze wordt herhaald ontwerpen met steeds complexere modellen voorkomen.

2. Robuuste managerarchitectuur Steeds meer verschillende functies worden op een enkele drager gerealiseerd. Deze diversiteit vraagt om standaardisering van ontwerptaal en -methodologie. Daarnaast moet de ontwerpautomatiseringsindustrie hiervoor geschikte specifieke ontwerptechnieken ondersteunen.

De in dit proefschrift beschreven constraint manager voorziet, naast een standaard formaat voor randvoorwaarden, ook in een robuuste architectuur waarmee

- nieuwe *plug-in*-modules geaccepteerd kunnen worden om veranderingen in technologie en ontwerpmethode te kunnen opvangen
- een consistente ontwikkeling van randvoorwaarden bereikt wordt, ongeacht de eigenaardigheden van de specifieke voorwaarde
- hergebruik van ontwerp en *mix-and-match* ondersteund wordt, zoals het nieuwe *VSI IP-core paradigm* vraagt.

Hierin zijn de mechanismen gedefinieerd om randvoorwaarden te propageren, *top-down* voor synthese en *bottom-up* voor verificatie.

De *manager* verdeelt de taken over *constraint-driven tools* en de transformatieroutines, waardoor de trend om steeds meer functies op één chip onder te brengen. Bovendien is zo'n modulaire architectuur gemakkelijk bij te werken, en zo te komen tot een pad naar een stabiele en consistente *design flow* met flexibele functionaliteit.

Binnen de gegeven architectuur is elk blok in de hiërarchische decompositie van een ontwerp volledig gekarakteriseerd door

(a) *constraint transformation methods*, die hogere-niveau-specificaties kunnen vertalen naar randvoorwaarden aan parameters op lagere niveaus

(b) *constraint-driven tool-sets*, die randvoorwaarden kunnen opleggen aan de ontwerpstappen.

3. Transformatie van randvoorwaarden Het concept van randvoorwaarde-transformatie is de definiëring van het vertaalproces tussen specificatie op een hoger niveau naar randvoorwaarden op parameters van een lager niveau. Hiervoor wordt een drie-staps-proces voorgesteld, dat dan op alle klassen van randvoorwaarden toepasbaar moet zijn. De drie stappen zijn modellering, reductie en generatie:

- **eenvoudige modellering** Hoe eenvoudiger de modellen hoe beheersbaarder het ontwerpproces. Bovendien kunnen nieuwe automatiseringsmethoden en technologieën dan gemakkelijk opgenomen worden. Voor analoge schakelingen wordt een lineair approximatie-model, gebaseerd op gevoeligheden, voorgesteld, waarbij uitgegaan wordt van de overdrachtsfunctie van de schakeling. De hiërarchische transformatie kan beginnen vanaf de gedragsmodellen van de schakeling. Als simulatieprogrammatuur ook gevoeligheidsberekeningen kan uitvoeren voor niet-lineaire schakelingen dan kan de methode ook op rf-schakelingen toegepast worden. Met een klein aantal berekeningen worden efficiënte modellen voor de transformatie afgeleid.
- **modelreductie ten behoeve van efficiëntie** Het transformatie-model moet alleen de nodige en voldoende verzameling randvoorwaarden bevatten. Modelreductie kan het optimaliseringprobleem voor de ontwerpgereedschappen aanzienlijk vereenvoudigen zonder de kwaliteit op dat abstractie-

niveau onacceptabel te laten worden. Voor het lineair approximatie-model voor analoge continue-tijd-schakelingen van hierboven, wordt een reductiemethode voorgesteld die gebruik maakt van numerieke technieken die Singular Value Decomposition (SVD) genoemd worden, en een gedecorreleerde transformatie opleveren. De eigenschappen van SVD worden dan benut om de essentiële kwadratische pseudo-inverse van de transformatie matrix te bepalen. Zo worden de belangrijkere kwaliteitskenmerken van de schakeling geselecteerd en welke parameters op het lagere niveau de meeste invloed hebben. Dit kan op elk lineair model toegepast worden.

- **generatie** Moderne siliciumtechnologie introduceert nieuwe randvoorwaarden in de latere stappen van het ontwerpproces. Naast zuiver parametrische randvoorwaarden zoals draadlengte en breedte, komen nieuwe tweede-orde verschijnselen te voorschijn die de ontwerptaken compliceren. Hun effect wordt meestal tegengegaan door speciale topologiekeuze. Daarom zijn, naast de gebruikelijke parametrische grenzen ook randvoorwaarden nodig die het mogelijk moeten maken een bepaalde topologie van schakelingen af te dwingen. Dit werd het eerst merkbaar bij layouts van analoge schakelingen. Reeds lang bekend zijn aanschuiven van transistoren en vouwen (*folding*) met afstemming- en symmetrie-eisen. In dit proefschrift wordt een nieuwe opstapelingsstrategie voor transistoren voorgesteld, die toegepast kan worden met variërende transistor-afmetingen. Ook "twee-dimensioneel"stapelen, tot nog toe alleen voorkomend bij handmatig ontwerpen, is hiermee mogelijk.

AUTOMATIC TEST PATTERN GENERATION FOR SYNCHRONOUS SEQUENTIAL CIRCUITS

M.H. Konijnenburg
21 december 1998
Promotor: prof.dr.ir. A.J. van de Goor

Om te kunnen garanderen dat geproduceerde chips correct functioneren is het structureel testen van deze chips op eventuele defecten noodzakelijk. Voor het structureel testen wordt automatisch een testset gegenereerd uitgaande van een foutmodel.

Het onderwerp van dit proefschrift is automatische test patroon generatie (ATPG) voor *synchrone sequentiële digitale schakelingen* op basis van het 'Single Stuck-at Fault' (SSAF) foutmodel. Door de zeer hoge complexiteit van ATPG voor sequentiële schakelingen is dit onderwerp nog steeds een onderzoeksgebied. Hoge fout efficiëntie kan voor veel van deze schakelingen niet of pas na zeer lange ATPG rekentijden behaald worden; dit in tegenstelling tot combinatorische schakelingen, waar hoge fout efficiëntie regel is. Er bestaan oplossingen om de test generatie complexiteit terug te brengen tot die van vergelijkbare combinatorische schakelingen, maar die hebben als nadeel verminderde prestaties van de chip, een groter chip oppervlak en langere test applicatie tijden. Het doel van dit onderzoek is een ATPG systeem te ontwikkelen voor sequentiële schakelingen dat een hogere fout efficiëntie bereikt en/of lagere test generatie tijden heeft in vergelijking met eerder gepubliceerd werk.

Na een uitgebreide inleiding van sequentiële schakelingen en ATPG in hoofdstukken 2 en 3, worden in hoofdstuk 4 drie problemen in STPG geïdentificeerd welke tot op heden niet opgelost zijn: het zoeken naar een oplossing in STPG is vaak incompleet en inefficiënt, bus-conflicten worden soms ten onrechte verondersteld aanwezig te zijn in een schakeling, en illegale toestanden (IT's) zijn vaak overgespecificeerd. Deze problemen zijn gerelateerd aan het gebruikte signaal model tijdens STPG en aan de identificatie van IT's. Gebaseerd op deze problemen en eerder gepubliceerd werk zijn open vragen en voorstellen opgesteld die in de latere hoofdstukken beantwoord en behandeld worden.

Hoofdstuk 5 beschrijft het ontwikkelde ATPG systeem voor sequentiële schakelingen; het bestaat uit een STPG gebaseerd op het deterministische FAN algoritme, en een aantal nieuwe pre-processen en nieuwe leer technieken ontwikkeld ter ondersteuning van de STPG. De STPG bevat behalve bestaande technieken, een aantal nieuwe technieken zoals fout afhankelijke kosten schattingen ter ondersteuning van het beslissingsproces tijdens STPG, en de 'State Restrictor' voor opslag van IT's, waarmee voorkomen wordt dat bekende IT's opnieuw gejustificeerd worden tijdens STPG.

Hoofdstuk 6 introduceert een nieuw signaal model: de *Power Set Logica* (PSL). Dit model wordt gevormd door de power-set (d.w.z. de set van alle partiële sets) van de set $\{0, 1, Z\}$. Met dit model is het bijvoorbeeld mogelijk om uit te drukken dat een signaallijn nog 0 of Z kan worden of dat een signaal lijn een onbekende

waarde heeft, maar dat die waarde òf 1, òf Z moet zijn. PSL lost twee van de drie problemen genoemd in hoofdstuk 4 op: Het zoek-proces tijdens STPG is gegarandeerd compleet en incorrecte busconflictdetectie kan niet voorkomen. Verder garandeert PSL dat alle beslissingen genomen tijdens STPG deterministisch zijn, in tegenstelling tot de soms willekeurige herbeslissingen in STPGs gebaseerd op enumeratieve signaal modellen. Door deze garantie van PSL verbetert de zoek-efficiëntie van de STPGs in grote mate. Ten slotte kan genoemd worden dat de resolutie van PSL veel hoger is dan bij andere signaal modellen waardoor de signaal waarden op de lijnen veel preciezer berekend kunnen worden. De experimenten bewijzen de kracht van PSL ten opzichte van andere signaal modellen: Significant hogere fout efficiëntie (gemiddeld is de fout efficiëntie voor de schakelingen met 8% gestegen) worden bereikt voor zowel industriële als ISCAS'89 benchmark schakelingen, met daarbij een reductie van CPU kosten (gemiddeld zijn de CPU kosten met 30% gedaald).

Hoofdstuk 7 beschrijft nieuwe technieken om de tot nu toe bekende IT-ruimte (de ruimte die omvat wordt door de lijst van huidig bekende IT's) uit te breiden. Deze technieken hebben als doel over-specificaties in de huidig bekende IT's te identificeren, waarmee het derde probleem beschreven in Hoofdstuk 4 wordt opgelost. Gebaseerd op de bekende IT's worden nieuwe kandidaat IT's gevormd, welke na een falende justificatie door de STPG ook IT worden. Deze nieuwe IT's omvatten minimaal de IT's waarmee ze gevormd werden. Deze omvatte IT's worden uit de lijst verwijderd, wat geheugen ruimte bespaard, en tegelijkertijd is de bekende IT ruimte gegroeid. Een nieuw leer proces wordt beschreven om de IT's te bepalen voordat STPG begint. Tenslotte wordt een nieuwe datastructuur beschreven voor de opslag van de IT's, waardoor veel geheugen bespaard wordt en de verwerkingssnelheid van de IT's significant verhoogd wordt. De experimenten tonen een zeer hoge fout efficiëntie, behaald binnen een redelijke tijd, voor de meeste ISCAS'89 schakelingen en industriële schakelingen. Voor 20 van de eerste 25 ISCAS'89 schakelingen is 100% fout efficiëntie behaald. Voor slechts 6 van de 38 schakelingen is de bereikte fout efficiëntie lager dan 90%. In vergelijking met eerder gepubliceerde resultaten is dit een grote vooruitgang.

Hoofdstuk 8 beschrijft de resultaten van een casestudie om de effectiviteit en efficiëntie van het ontwikkelde ATPG systeem te demonstreren. De 'case' is de Philips 80C51 micro-controller. ATPG is verricht op een 'full-scan' versie, een volledig sequentiële versie en op diverse 'partial-scan' versies van die schakeling. De resultaten tonen de effectiviteit en efficiëntie van de nieuw ontwikkelde STPG aan; een hoge fout efficiëntie wordt gehaald binnen een redelijke test generatie tijd. Verder laten de resultaten zien dat een 'partial-scan' versie met ongeveer 50% scan-flipflops een fout dekking oplevert die vergelijkbaar is met de fout dekking voor de 'full-scan' versie.

Tot slot wordt in Hoofdstuk 9 een samenvatting gegeven van het onderzoek, en worden de belangrijkste bijdragen opgesomd en aanbevelingen gedaan voor toekomstige uitbreidingen en verbeteringen.

DESIGN SPACE EXPLORATION OF STREAM-BASED DATAFLOW ARCHITECTURES

A.C.J. Kienhuis
29 januari 1999
Promotor: prof.dr.ir. R.M. Dewilde

Er is momenteel een trend waarneembaar dat applicatie specifieke architecturen steeds meer programmeerbaar worden, om multifunctionele en multistandaard producten te kunnen ondersteunen. Het kenmerk van deze nieuwe architecturen is dat ze een set van applicaties kunnen ondersteunen in plaats van één enkele applicatie. We hebben echter ondervonden dat goede, algemeen toepasbare ontwerpmethoden niet voorhanden zijn voor dit soort architecturen.

Als voorbeeld van zo'n programmeerbare architectuur, laten wij in dit proefschrift de *stroom gebaseerde dataflow architectuur* zien. Deze architectuur past in de categorie van dataflow architecturen en is zeer geschikt voor stroom gebaseerde, hoge prestatie applicaties die gevonden worden in bijvoorbeeld real-time multimedia toepassingen.

Bij het ontwerp van deze stroom gebaseerde dataflow architecturen moeten erg veel keuzen gemaakt worden, waarbij elke keuze leidt tot een andere architectuur, met een eigen specifiek gedrag en prestatie. Nu wordt het voor ontwerpers steeds moeilijker om die keuzen te maken waarbij de steeds complexer wordende architectuur nog voldoet aan alle ontwerpeisen, waaronder programeerbaarheid.

Wij hebben de vele ontwerpkeuzen gestructureerd met behulp van een *architectuur template*. Deze beschrijft de totale klasse van stroom gebaseerde architecturen met behulp van parameters en heeft dus een duidelijk begrensde ontwerpruimte. De probleemstelling van dit proefschrift is om een methode te ontwikke-

len die ontwerpers helpt bij het vinden van de parameterwaarden van een architectuur template, zodanig dat een haalbare architectuur gevonden wordt in de ontwerpruimte. Een haalbare architectuur voldoet aan de opgelegde ontwerpeisen waaronder: doorzet en utilisatie, maar ook gebruikt vermogen en silicium oppervlakte.

In dit proefschrift presenteren wij als methodiek de *Y-chart aanpak*, waarmee ontwerpers keuzen kunnen kwantificeren. De Y-chart aanpak genereert een objectieve basis voor het motiveren en maken van keuzen. De Y-chart aanpak leidt tot een *Y-chart omgeving* en wij presenteren in dit proefschrift zo'n Y-chart omgeving voor de klasse van stroom gebaseerde dataflow architecturen. Een Y-chart omgeving bestaat uit 6 componenten en elke component wordt besproken. Zo bespreken we een hoog niveau methode waarmee prestatie analyse gedaan kan worden, een architectuurmodellering aanpak, een applicatie-modellering aanpak, een aanpak voor het construeren van een retargetable simulator, en een aanpak om applicaties af te beelden op een specifieke instantie van de architectuur template. Tenslotte bespreken we ook hoe we de ontwerpruimte van architecturen op een systematische manier kunnen exploreren.

We hebben de ontwikkelde Y-chart omgeving gebruikt in twee ontwerpcases. Daaruit blijkt dat de Y-chart omgeving inderdaad ontwerpkeuzen kwantificeert. Bovendien laten de twee ontwerpcases zien dat we de ontwerpruimte van architecturen snel kunnen exploreren, op een hoog niveau van abstractie. De getallen die gepresenteerd worden, zullen niet direct tot de verdere ontwikkeling van de twee architecturen leiden, maar geven wel duidelijk aan waartoe de methode in staat is. Het geeft ontwerpers inzicht in de vele complexe afwegingen tussen parameterwaarden en prestatiegetallen die aanwezig zijn in dit soort programmeerbare architecturen. Soortgelijke resultaten zijn zeer moeilijk te verkrijgen met de hedendaagse ontwerpmethodes; en als ze te verkrijgen zijn heeft dat veel meer ontwerp- en simulatietijd gekost.

ANALOG NEURAL NETWORKS IN SINGLE-ELECTRON TUNNELING TECHNOLOGY

M.J. Goossens
19 october 1998
Promotor: prof.dr.ir. A.H.M. van Roermund

Dit proefschrift beschrijft hoe compacte bouwblokjes voor grote artificiële neurale netwerken gemaakt kunnen worden met *Single-Electron* Tunneling transistoren. 'Single-electron tunneling' verwijst naar het verschijnsel dat de elektronen per stuk door dit type transistor stromen.

Na het inleidende hoofdstuk 1, geeft hoofdstuk 2 een kort overzicht van de problemen en mogelijkheden die zich voordoen bij het implementeren van elektronische neurale netwerken. Grote geïntegreerde neurale netwerken zullen naar verwachting krachtige signaalprocessoren opleveren, maar de realisatie van dergelijke netwerken is vooralsnog onmogelijk omdat er geen compacte implementatievorm beschikbaar is. Door de fysische en technologische eigenschappen optimaal te benutten, kunnen de primitieve functies van een neuraal netwerk gerealiseerd worden door middel van compacte *neurale devices*, een implementatievorm die naar verwachting de realisatie van grote neurale netwerken wel mogelijk maakt.

Hoofdstuk 3 beschrijft de twee basisgedachten die ten grondslag liggen aan het ontwerp van de compacte neurale bouwblokjes. Allereerst is het van belang dat men zich niet aan strikt omschreven primitieve functiedefinities houdt. Een nauwgezette realisatie van deze functies zal namelijk in het algemeen niet het meest compacte ontwerp opleveren, omdat de technologische eigenschappen dan niet optimaal gebruikt worden. Ten tweede worden neurale netwerken gebruikt, omdat onnauwkeurigheden onvermijdelijk zijn in compacte elektronische circuits. De onzekerheden die hieruit voortvloeien kunnen op systeemniveau geëlimineerd worden door op geschikte wijze de resultaten van zeer vele devices te combineren en door het leermechanisme van het neurale netwerk.

Hoofdstuk 4 behandelt uitgebreid de basisbouwsteen uit dit proefschrift: de Single Electron Tunneling (SET) transistor. De werking van de SET-transistor is gebaseerd op het tunnelen van individuele elektronen door het device. Met een spanning op de gate van de transistor kan het tunnelproces beïnvloed worden, hetgeen aan de uitgang van het device kan worden gedetec-

teerd. Het bijzondere van de SET-transistor is dat de overdrachtsfunctie van de gate naar de uitgang een periodieke functie is. Zoals zal blijken uit de volgende hoofdstukken, is de SET-transistor hierdoor niet alleen een unieke, maar vooral ook een veelzijdige component. De SET-transistor heeft echter ook een belangrijke nadelige eigenschap. Zijn gedrag wordt namelijk sterk beïnvloed door willekeurige offset-ladingen. Het succes van een toepassing van SET-transistoren hangt dan ook sterk af van de invloed van deze offsetladingen op de functionaliteit van het ontwerp.

In hoofdstuk 5 worden twee configuraties van SET-transistoren beschreven waarmee de activatiefunctie van het neuron gerealiseerd kan worden. Uit een vergelijking met twee andere SET-neuronen uit de literatuur, blijkt dat een van de in dit hoofdstuk beschreven neuronen de voorkeur geniet. De betreffende neuron bestaat uit slechts één SET-transistor, wat een zeer compacte implementatie is. Bovendien is zijn willekeurige offset-lading equivalent met een willekeurige waarde van de drempelwaarde van het neuron, waardoor de offset door het leeralgoritme bijgeregeld kan worden. De niet-lineaire overdrachtsfunctie van dit neuron wordt gevormd door een gedeelte van een periode van de overdrachtsfunctie van de SET-transistor.

Hoofdstuk 6 laat zien hoe met een enkele SET-transistor ook een synaps gemaakt kan worden. De vermenigvuldigingsfactor van de synaps wordt gegeven door de helling van het klein-signaalgedrag van de SET-transistor. Deze lokale helling hangt af van het instelpunt op de groot-signaalfunctie en als dit instelpunt afhankelijk gemaakt wordt van het gewicht van de synaps, is het totale gedrag van de SET-transistor vergelijkbaar met de gewenste vermenigvuldigende werking. Ook in dit geval kan het leeralgoritme de willekeurige offset afregelen, omdat de offset-lading het zelfde effect heeft als een willekeurige afwijking van de gewichtswaarde die toch al door het leeralgoritme afgesteld moet worden.

In hoofdstuk 7 komt het onderling verbinden van neuronen en synapsen aan de orde. De beperkte toegestane belasting aan de ingang van een SET-transistor en de beperkte lokale spanningsversterking maken de keuze voor een netwerktopologie met weinig verbindingen noodzakelijk. Het hoofdstuk laat zien dat een klein enkel-laags neuraal netwerk met SET-neuronen en -synapsen de elementaire neurale classificaties uit kan voeren: de positie van de scheidingslijn tussen een actieve en een niet-actieve neuronuitgang kan namelijk veranderd worden met behulp van de gewichtswaarden van de synapsen en de drempelwaarden van de neuronen.

Het leeralgoritme is een onmisbaar onderdeel van een neuraal netwerk. Hoofdstuk 8 analyseert waaraan een leeralgoritme voor neurale netwerken op basis van SET-transistoren moet voldoen. Vervolgens wordt het *Random Weight Change* leeralgoritme beschreven, dat kleine willekeurige veranderingen aanbrengt aan de gewichten en drempelwaarden om te bepalen hoe deze aangepast moeten worden zodat het netwerk het gewenste gedrag gaat vertonen. Hierdoor is het algoritme niet afhankelijk van specifieke synaps- en neuroneigenschappen en kan het een tweelaags neuraal netwerk van SET-transistoren de XOR-functie leren. Dat lukt zelfs als er fouten optreden van het type dat voor zou komen indien een gedeelte van het leeralgoritme zelf ook in SET-technologie geïmplementeerd wordt.

Het SET-neuron en de SET-synaps uit dit proefschrift zijn bijzonder compacte implementaties van neurale cellen die laten zien dat het benutten van specifieke eigenschappen van devices en het vertrouwen op de adaptieve werking van een neuraal systeem een succesvolle weg belooft te zijn naar grote compacte artificiële neurale netwerken.

STATIC AND DYNAMIC TRANSLINEAR CIRCUITS

J. Mulder
6 Oktober 1998
Promotor: prof.dr.ir. A.H.M. van Roermund

Het ontwerp van dynamische translineaire en logdomein circuits heeft zich ontwikkeld tot een duidelijke nieuwe trend binnen de analoge elektronica. Het gebruik van de capaciteit als een basis translineair netwerkelement leidt namelijk tot een aanzienlijke toename van de potentiële functionaliteit van translineaire circuits. Dynamische translineaire schakelingen kunnen worden toegepast voor de realisatie van zowel lineaire als niet-lineaire frequentieafhankelijke signaalbewerkingsfuncties. Met name op het gebied van de analoge tijdcontinue filters, dat zich gesteld ziet voor serieuze uitdagingen door de steeds strengere eisen ten aanzien van voedingsspanning, vermogensconsumptie en bandbreedte, vormen translineaire (TL) filters een interessant en uitermate geschikt alternatief voor die toepassingen die wèl een groot dynamisch bereik vereisen, maar niet noodzakelijk een hoge signaalruisverhouding. Zo kan bij lage voedingsspanningen het dynamisch bereik van TL filters gemakkelijk groter zijn dan het dynamisch bereik haalbaar met opamp-MOSFET-C

filters. Bandbreedte, vermogensconsumptie en regelbaarheid van TL filters zijn vergelijkbaar met de specificaties van g_mC filters die opgebouwd zijn uit enkel bipolaire transistoren. Het is dan ook niet verwonderlijk dat de onderzoeksactiviteiten op het gebied van TL filters de laatste jaren snel zijn toegenomen!

Dit proefschrift beschrijft de analyse en synthese van zowel statische translineaire (STL) als dynamische translineaire (DTL) schakelingen. Hierbij wordt veelvuldig gebruik gemaakt van de grote overeenkomsten die bestaan tussen conventionele (statische) en dynamische translineaire netwerken. Eén van de conclusies van dit proefschrift is dat voor de analyse en synthese van DTL schakelingen het best gebruik kan worden gemaakt van beschrijvingen in termen van stromen. Een bijkomend voordeel van deze methode is dat de bestaande theorie en ervaring op het gebied van STL circuits direct toepasbaar zijn op DTL netwerken.

Na de algemene introductie in hoofdstuk 1 worden in hoofdstuk 2 de ontwerpprincipes besproken die in dit proefschrift aan bod komen. Allereerst wordt een algemeen model opgesteld voor dynamische circuits die opgebouwd zijn uit *niet-lineaire* functies, maar die toch een *lineaire* frequentie-afhankelijke overdracht van ingang naar uitgang hebben. Het model omvat zowel 'syllabic companding' als 'instantaneous companding' filters. Dynamische translineaire en dynamische spannings-translineaire filters zijn speciale gevallen binnen dit model. De ontwerpprincipes van deze filters worden vervolgens behandeld op circuitniveau. Daarnaast worden de conventionele TL principes kort beschreven.

Een gestructureerde synthesemethode kan niet zonder een bijbehorende analysemethode. Hoofdstuk 3 behandelt derhalve eerst de analyse van TL schakelingen, waarna hoofdstuk 4 ingaat op het eigenlijke ontwerpproces. Na een korte samenvatting van de bestaande analysemethode voor STL circuits, worden nieuwe methoden beschreven voor de analyse van DTL schakelingen. Deze methoden zijn gebaseerd op grootsignaalmodellen omdat kleinsignaalmodellen onbruikbaar zijn om de grootsignaallineariteit van een TL filter te bewijzen dan wel om de functionaliteit van niet-lineaire DTL circuits bloot te leggen. De sleutel tot de analyse van DTL schakelingen wordt gevormd door de capaciteitsstromen. Uitdrukkingen voor de capaciteitsstromen in termen van de collectorstromen kunnen worden afgeleid uit de lussen die iedere capaciteit vormt met een aantal transistorjuncties in serie. Twee nieuwe analysemethoden worden beschreven. De eerste methode resulteert direct in een hogere orde differentiaalvergelijking die de schakeling beschrijft. Bij de tweede methode worden fictieve transistoren aan het netwerk toegevoegd, waarna een toestandsbeschrijving van het circuit kan worden gevonden. Voordeel van de laatstgenoemde methode is een lagere rekenintensiteit. Tenslotte worden in hoofdstuk 3 de karakteristieken geanalyseerd van een aantal typen DTL schakelingen die in de literatuur zijn beschreven: log-domein, tanh en sinh filters.

Hoofdstuk 4 vormt de kern van dit proefschrift en behandelt het gestructureerd ontwerp van zowel STL als DTL schakelingen. De ontwikkelde synthesemethode kan gezien worden als een generalisatie van de bestaande ontwerpmethode voor STL circuits. Het ontwerp begint met een dimensieloze wiskundige vergelijking: een polynoom, een rationele functie, een wortelfunctie of een differentiaalvergelijking. Door de toepassing van eenvoudige transformaties wordt een vergelijking gevonden met de juiste dimensies om een TL realisatie mogelijk te maken. Een aantal eigenschappen van het uiteindelijke circuit zijn direct terug te voeren op de gebruikte transformaties. Aangezien STL schakelingen al beschreven worden door een polynoom is de volgende ontwerpstap alleen van toepassing op DTL circuits. Deze stap betreft het vertalen van de tijdafgeleiden in de differentiaalvergelijking naar capaciteitsstromen. Om deze capaciteitsstromen te definiëren wordt een toestandsbeschrijving gebruikt. De verschillende vormen van definities geven een klassificatie van TL filters die breder is dan de bestaande klassificaties die bekend zijn uit de literatuur. Door het vervangen van de tijdafgeleiden door capaciteitsstromen wordt de differentiaalvergelijking herleid tot een polynoom in meerdere variabelen. In dit stadium van het ontwerpproces worden zowel de STL als de DTL functies door een polynoom beschreven. Het resterende ontwerptraject is daarom vrijwel identiek voor zowel STL als DTL schakelingen. De eerstvolgende stap is TL decompositie; het polynoom wordt afgebeeld op een (set van) TL lusvergelijking(en), waarbij onderscheid gemaakt wordt in niet-parametrische en parametrische decomposities. Beide typen worden beschreven en een algoritme voor de automatische generatie van niet-parametrische decomposities wordt ontwikkeld. Voor parametrische decomposities ontbreekt tot nu toe een dergelijk algoritme. Wanneer een decompositie gevonden is, volgt de 'hardware'-implementatie van de TL lusvergelijkingen. Dit proces bevat vele keuzemogelijkheden, zoals de lus-topologie en het gebruik van alternatieve exponentiële devices. Vervolgens vergelijkt hoofdstuk 4 de ontwikkelde methode met alter-

natieve synthesemethoden die beschreven zijn in de literatuur. Ook worden in dit hoofdstuk klasse-AB implementaties behandeld.

De theorie gepresenteerd in hoofdstuk 3 en 4 is gebaseerd op ideale exponentiële devices. In de praktijk resulteren de diverse niet-idealiteiten van de componenten in distorsie. Hoofdstuk 5 beschrijft de effecten van eindige stroomversterking, parasitaire weerstanden en capaciteiten, 'body effect', 'Early effect' en 'mismatch'. Tevens worden methoden behandeld die de invloed van deze niet-idealiteiten reduceren.

Hoofdstuk 6 gaat in op de ruiseigenschappen van zowel STL als DTL netwerken. Translineaire circuits staan niet bepaald bekend om hun goede ruiseigenschappen. In klasse-AB schakelingen kan de signaal-ruisverhouding nog verder verslechteren door signaal-ruis-intermodulatie, die het gevolg is van het exponentiële gedrag van de transistoren. Dit neemt niet weg dat het dynamisch bereik van klasse-AB implementaties uitstekend kan zijn. De analyse van ruis in TL schakelingen is niet-triviaal. Grootsignaalanalyses zijn nodig om de signaal-ruis-intermodulatie en het niet-stationaire karakter van de interne ruisbronnen mee te kunnen nemen in de berekeningen. Dit hoofdstuk beschrijft een elegante ruisanalysemethode die gebruik maakt van de ontwikkelde TL analysemethoden enerzijds en resultaten uit de niet-lineaire ruistheorie anderzijds.

Het gebruik van MOS transistoren in het sterke-inversiegebied, dat beschreven wordt door een kwadratisch model, leidt tot de verwante klasse van spanningstranslineaire circuits. Ook hier kan een onderscheid worden gemaakt tussen statische en dynamische schakelingen. Hoofdstuk 7 bediscussieert het praktisch nut van deze schakelingen, waarbij de nadruk ligt op dynamische spannings-translineaire netwerken. Geconcludeerd kan worden dat spannings-translineaire circuits weliswaar interessant zijn vanuit een academisch standpunt, maar vrijwel onbruikbaar zijn in de praktijk. Allereerst is dit te wijten aan de zeer beperkte geldigheid van het kwadratische MOS-model. Daarnaast wordt synthese bemoeilijkt door de onhandelbare wiskundige vergelijkingen. Verder vereist de linearisatie van mogelijke dynamische spannings-translineaire uitgangstrappen veel hardware, terwijl de theoretische toename van het dynamisch bereik minimaal is. Het equivalent van de DTL 'sinh'-uitgangstrap vormt hierop een uitzondering. Dit circuit, feitelijk een welbekende schakeling, is zelf reeds lineair en maakt gebruik van het feit dat het MOS-model een polynoom is, en geen transcendente functie zoals het exponentiële transistormodel.

Om de ontwikkelde theorie te illustreren en te verifiëren worden in hoofdstuk 8 een aantal realisaties beschreven. De nadruk ligt hierbij op DTL circuits. Eerst worden echter een aantal niet-conventionele STL circuits behandeld. Deze maken gebruik van enkele specifieke eigenschappen van de MOS-transistor in het zwakke-inversiegebied. Vervolgens worden twee TL filters beschreven die ontworpen zijn voor een voedingsspanning van 1 volt en een minimale vermogensconsumptie. Het eerste filter heeft een tweede orde overdracht en werkt in klasse A, het tweede filter (een integrator) werkt in klasse AB en realiseert dan ook een aanzienlijk betere specificatie van het dynamisch bereik. De toepassing van het DTL principe voor niet-lineaire dynamische functies wordt geïllustreerd middels het ontwerp van een RMS-DC converter. Als laatste voorbeeld wordt een spannings-translineaire oscillator beschreven.

Hoofdstuk 9 bevat de conclusies van dit proefschrift.

MONOLITHICALLY INTEGRATED SILICON BIPOLAR RF OSCILLATORS

Yanling Sun.
2 februari 1999
Promotor: prof.dr.ir. R.G.F. Baets

De groeiende behoefte aan telecommunicatie heeft de vraag gestimuleerd naar goedkope, radiofrequente geïntegreerde circuits (RFIC's) van hoge kwaliteit. De siliciumtechnologie, gerijpt, maar nog steeds voortgaande in ontwikkeling, heeft zich bewezen als een geschikte drager voor microgolf-toepassingen. In het hart van al deze elektronische systemen verschijnen RF oscillatoren alsmaar meer in geïntegreerde vorm. Het belangrijkste kenmerk van oscillatoren waarin ingenieurs zeer geïnteresseerd zijn, is de frequentiestabiliteit, onderscheiden in lange- en korte-termijnstabiliteit (of faseruis). In het algemeen is de frequentiestabiliteit van RFIC-oscillatoren slechter dan die van discrete oscillatoren, vooral bij microgolffrequenties. Het realiseren van een verbeterde frequentiestabiliteit in RFIC-oscillatoren is bijzonder uitdagend. Dit proefschrift houdt zich voornamelijk bezig met zowel de faseruis als ook met de lange-termijnstabiliteit van RFIC-oscillatoren in silicium.

Het in één keer goed ontwerpen van RFIC-oscillatoren in silicium hangt af van de beschikbaarheid van nauwkeurige, technologie-afhankelijke componentenmodellering. De hoofdstukken 1, 2 en 3 behandelen de stand van zaken op het gebied van bipolaire en BiC-

MOS silicium- technologieën, de modellering van de respectieve componenten op de chip en de oscillatortheorie. Zij vormen de achtergrond voor ons werk.

De korte-termijnstabiliteit van de frequentie van een signaal wordt in de praktijk aangeduid met de term faseruis. Het knelpunt hij de vermindering van faseruis in RFIC-oscillatoren is de realisering van resonatoren met een hoge kwaliteitsfactor (Q) bij radiofrequenties. De hoofdstukken 4 en 5 gaan over het ontwerpen en realiseren van resonatoren met hoge Q in silicium. In hoofdstuk 4 worden de fabricage, modellering en metingen van spiraalvormige, opgehangen membraaninductoren, MIM-capaciteiten en transmissielijnen op gewone siliciumsubstraten bediscussieerd. Voor al deze passieve componenten worden de parasitaire capaciteiten naar het substraat drastisch verminderd en de werking hij hoge frequenties aldus verbeterd. Verder is de gemeten Q aantoonbaar verbeterd ten opzichte van normaal gefabriceerde dunne-filmcomponenten. De DC weerstand van de spiraalvormige inductoren is anderzijds iets verminderd door dubbellaags metalen contacten te gebruiken. In hoofdstuk 5 worden zowel smal- als breedbandige actieve inductoren geïntroduceerd teneinde de DC weerstand van de inductoren geheel te elimineren in het gewenste frequentiegebied. Er wordt aangetoond dat passieve, opgehangen membraancomponenten in actieve inductoren niet alleen het energieverbruik verlagen en de werkfrequenties verhogen, maar ook de ruis van actieve inductoren reduceren. Actieve inductoren met frequenties tot 9 GHz, met relatieve bandbreedten $> 10\%$ en Q's > 100 werden verkregen.

Om een helder beeld te geven van de frequentiestabiliteit op korte termijn wordt in hoofdstuk 6 de faseruis in RFIC-oscillatoren geanalyseerd voor verschillende soorten resonatoren. Gebaseerd op de devices uit de hoofdstukken 4 en 5 werden actieve resonatoren gebruikt voor het ontwerpen van gebalanceerde oscillatoren, zoals besproken in hoofdstuk 7. Aan de hand van een echt ontwerp wordt aangetoond dat in silicium gemaakte, gebalanceerde RFIC-oscillatoren met actieve resonatoren superieur zijn ten opzichte van op de chip gemaakte, passieve resonatoren. Bovendien is het ruisgedrag van in silicium gemaakte, opgehangen actieve resonatoren verbeterd in vergelijking met dat van actieve resonatoren die rechtstreeks in gewoon silicium zijn gemaakt.

De frequentiestabiliteit op lange termijn wordt beïnvloed door temperatuurstabiliteit, verloop ten gevolge van veroudering enz. Van al deze invloeden blijkt de temperatuurstabiliteit de meest kritische te zijn. Verdere modellering betrokken op de temperatuurafhankelijkheid, is in hoofdstuk 8 gegeven. Dit hoofdstuk beschrijft op een systematische wijze methoden voor temperatuurmodellering, analyse en ontwerp van temperatuurcompensatie op de chip. Een VCO voor lage spanning en gebruikt in de UHF-band dient als voorbeeld. Een bestaande, breedbandige, gebalanceerde oscillator, gerealiseerd in het Philips' BiCMOS-proces Qubic-1, is bestudeerd. Gebaseerd op nauwkeurige modellering en analyse is er een uitstekende overeenkomst gevonden tussen ontwerp en metingen. In het frequentiegebied van 470–930 MHz is de specificatie voor het frequentieverloop in een temperatuurbereik van 250°C verkleind tot < 0.5 MHz.

Als conclusie kunnen we stellen dat dit proefschrift de theorie en de praktijk behandelt van een verbetering van de frequentiestabiliteit van RFIC-oscillatoren op een siliciumchip. De opgehangen passieve componenten en actieve inductoren in silicium, zoals in dit proefschrift beschreven, kunnen niet alleen worden toegepast in RFIC-oscillatoren, maar ook in vele andere bouwstenen in silicium, zoals filters, versterkers enz. Het in deze studie gepresenteerde materiaal zal een nuttige bijdrage blijken te zijn tot het ontwerpen van RFIC-oscillatoren in siliciumchips.

ADVANCED LOW-VOLTAGE AND HIGH-SPEED TECHNIQUES FOR BICMOS, CMOS AND BIPOLAR OPERATIONAL AMPLIFIERS

K.J. de Langen
8 maart 1999
Promotor: prof.dr.ir. J.H. Huijsing

Dit proefschrift beschrijft de theorie, het ontwerp en de realisatie van geavanceerde versterkers in BiCMOS, CMOS en bipolaire technologie die werken op een lage voedingsspanning en een hoge snelheid hebben.

Hoofdstuk 1: De toenemende complexiteit van elektronische systemen vraagt om een grotere bandbreedte, een lagere voedingsspanning en een verlaging van het vermogensverbruik. Door de lage voedingsspanning en het lage vermogensverbruik wordt het dynamisch bereik van versterkers drastisch verlaagd. Om het dynamisch bereik zo groot mogelijk te houden moet de uitgangstrap van de versterker een 'rail-to-rail' uitgangsbereik hebben. Bij gebruik van eenheidsterugkoppeling moet ook de ingangstrap een 'rail-to-rail' ingangs-

spanning kunnen verwerken. Verder maakt het verlagen van de voedingsspanning het gebruik van schakelingen als de Darlington onmogelijk. Bij de allerlaagste voedingsspanning kunnen zelfs cascodes niet meer bijdragen tot de versterking zodat de versterker slechts bestaat uit een cascade van trappen.

Na het bespreken van spanningsbeperkingen en bandbreedtebeperkingen van transistoren worden de beginselen van versterkers, die bij lage voedingsspanningen werken efficiënt gebruik maken van het vermogen, behandeld. Een 'rail-to-rail' ingangstrap wordt gerealiseerd door een N-type en een P-type ingangstrap parallel te schakelen. Uitgangstrappen met een 'rail-to-rail' bereik bestaan uit twee complementaire transistoren in gemeenschappelijke *source* of gemeenschappelijke *emitter* schakeling. De uitgangstrap wordt ingesteld in klasse AB om zuinig met bet vermogen om te gaan.

Een versterker bestaat uit een aantal trappen om voldoende versterking te bereiken. In bipolaire technologie zijn tenminste drie trappen nodig, terwijl in CMOS technologie twee trappen voldoende zijn als de voedingsspanning hoger is dan één 'gate-source' spanning en twee verzadigingsspanningen. Bij de allerlaagste voedingsspanning gelijk aan één 'gate-source' spanning en een verzadigings-spanning zijn er ook in CMOS tenminste drie trappen nodig. In BiCMOS technologie kunnen de voordelen van CMOS en bipolaire technologie worden gecombineerd: de grote transconductantie van de bipolaire transistor levert een grote bandbreedte bij toepassing in de uitgangstrap en een lage 'offset' spanning bij toepassing in de ingangstrap, terwijl de hoge ingangsimpedantie van CMOS transistoren veel versterking oplevert in de tussentrap.

Hoofdstuk 2: Na bet bespreken van de belangrijkste parameters van de ingangstrap, zoals 'offset', 'common-mode' rejectie en ruis worden 'rail-to-rail' ingangstrappen gerealiseerd door een N-type ingangstrap te combineren met een P-type ingangstrap. Zonder het treffen van verdere maatregelen leidt dit tot een verandering van de transconductantie als functie van de 'common-mode' ingangsspanning. De verandering van de transconductantie veroorzaakt vervorming en variatie van de bandbreedte van de versterker. Daarom is een schakeling nodig die de g_m constant regelt. Eenvoudige g_m regelingen controleren de instelstroom van de ingangstrap in bipolaire technologie, of de 'gate-source' spanningen in CMOS technologie. Het interessants zijn de regelingen met stroomschakelaars waarbij de 'common-mode' uitgangsstromen constant zijn en die zowel in CMOS als in bipolaire technologie kunnen worden toegepast. Doordat de common-mode uitgangsstromen niet variëren blijft bet benodigde optelcircuit eenvoudig. Verder kan op zeer eenvoudige wijze een extra uitgangssignaal worden gerealiseerd zonder de gehele ingangstrap dubbel uit te voeren. Het extra uitgangssignaal wordt gebruikt bij de zogenaamde 'multipath' compensatietechniek waarbij de bandbreedte van drietrapsversterkers wordt vergroot. Tenslotte wordt bet realiseren van instelstroombronnen behandeld om de transconductantie van de ingangstrap onafhankelijk te maken van de temperatuur. In bipolaire technologie wordt dit bereikt met de bekende PTAT stroombron. In CMOS leidt bet toepassen van een topologie vergelijkbaar met de PTAT bron tot hetzelfde resultaat.

Hoofdstuk 3: Een 'rail-to-rail' uitgangsbereik wordt verkregen door in de uitgangstrap twee complementaire transistoren in gemeenschappelijke *source* of gemeenschappelijke *emitter* schakeling te gebruiken. Een compromis tussen vermogensverbruik en vervorming wordt bereikt door de uitgangstrap in klasse AB in te stellen. De klasse AB instelling kan op twee manieren worden gerealiseerd: door middel van een 'feedforward' regeling of door middel van een 'feedback' regeling. Een aantal voorbeelden van beide principes in CMOS technologie en in bipolaire technologie wordt behandeld. Verder wordt de stabiliteit van de 'feedback' regeling onderzocht. De 'all-NPN uitgangstrap' wordt ook behandeld vanwege het belang van deze schakeling voor versterkers met zeer grote bandbreedte en grote uitgangsstromen. Tenslotte wordt een overzicht gegeven van uitgangstrappen in BiCMOS technologie en worden schakelingen behandeld voor bet beveiligen van de uitgangstransistoren tegen grote stromen en voor bet beperken van de verzadiging van de uitgangstransistoren.

Hoofdstuk 4: Een versterker bestaat uit een aantal trappen om voldoende versterking te bereiken. Theoretisch zijn er een bepaald aantal trappen nodig om de hoogste bandbreedte te bereiken. Praktisch gezien neemt de bandbreedte af als bet aantal trappen wordt uitgebreid bij toepassing van Miller compensatie. De optimalisatie van tweetraps versterkers met Miller compensatie wordt behandeld evenals twee varianten: 'multipath-Miller-zero-cancellation', waarbij het nulpunt in het rechter halfvlak wordt verwijderd en 'nested-cascoded-Miller' compensatie, waarbij de bandbreedte ten opzichte van Miller compensatie met

een factor twee wordt vergroot.

In bipolaire technologie, in BiCMOS technologie en in CMOS technologie, zijn bij de laagste voedingsspanning drie trappen noodzakelijk. Drietrapsversterkers kunnen worden gecompenseerd met 'nested-Miller' compensatie. Verder worden twee nieuwe actieve varianten van 'nested-Miller' compensatie behandeld: 'cascoded-nested-Miller' compensatie en 'mirrored-nested-Miller' compensatie. Met 'cascoded-nested-Miller' compensatie wordt een lagere vervorming bij hogere frequenties bereikt, terwijl 'mirrored-nested-Miller' compensatie leidt tot een vereenvoudiging van drietraps laagspanningsversterkers, door gebruik te maken van de stroomspiegel in het optel circuit van de ingangstrap in plaats van een extra stroomspiegel tussen uitgangstrap en tussentrap.

Met drietraps 'nested-Miller' versterkers is de bandbreedte een factor twee lager dan met een tweetrapsversterker Dit kan worden voorkomen door gebruik te maken van 'multipath-nested-Miller compensatie' waarbij de grote versterking van een drietrapsversterker wordt gecombineerd met de grote bandbreedte van een tweetrapsversterker. Tenslotte wordt aandacht besteed aan de 'settling time' van versterkers en aan de programmeerbaarheid van versterkers.

Hoofdstuk 5: Met behulp van de technieken beschreven in de vorige hoofdstukken, zijn een aantal versterkers ontworpen in bipolaire technologie, CMOS technologie en BiCMOS technologie.

Twee versterkers zijn ontworpen in bipolaire technologie: een versterker met een zeer grote 'unity-gain' bandbreedte van1 GHz en een versterker met een grote verhouding tussen de maximum uitgangsstroom van 100 mA en de ruststroom van 350 mA. Deze versterker heeft een bandbreedte van 1 MHz en kan een belasting van 100 pF aan.

Vijf versterkers zijn ontworpen in CMOS voor een belasting van 5 pF. Drie van deze versterkers hebben een compacte topologie. De eerste versterker heeft een 'rail-to-rail' uitgangstrap, is gerealiseerd in een 1.6 mm proces en heeft een 'unity-gain' bandbreedte van 4 MHz. De tweede versterker is gerealiseerd in een 0.8 mm technologie en heeft een 'unity-gain' bandbreedte van 14 MHz. De derde versterker bevat zowel een 'rail-to-rail' ingangstrap als een 'rail-to-rail' uitgangstrap. Deze versterker is gemaakt in een 1.6 mm proces en heeft een bandbreedte van 4 MHz. Twee andere versterkers zijn ontworpen voor de allerlaagste voedingsspanning gelijk aan één 'gate-source spanning en één verzadigingsspanning. De eerste versterker is gecompenseerd met 'mirrored-nested-Miller' compensatie en gerealiseerd in een 1.6 mm technologie. Deze versterker heeft een bandbreedte van 4.8 MHz en de minimum voedingsspanning is 1.5 V. De tweede versterker is gecompenseerd met 'nested-Miller' compensatie en is gemaakt in een 0.8 mm proces. Deze versterker heeft een bandbreedte van 10 MHz en een minimum voedingsspanning van 1.2 V.

In een 0.8 mm BiCMOS technologie zijn vijf versterkers ontworpen voor een belasting van 5 pF. De eerste twee versterkers hebben een compacte topologie en een 'unity-gain' bandbreedte van 20 MHz. Twee andere versterkers zijn ontworpen voor een voedingsspanning van 1.3 V. De eerste versterker bevat 'nested-Miller' compensatie en heeft een 'unity-gain' bandbreedte van 18 MHz. De tweede versterker gebruikt 'multipath-nested-Miller' compensatie en bereikt een bandbreedte van 26 MHz. De laatste versterker maakt gebruik van de krachtige combinatie van een 'all-NPN' uitgangstrap met een PMOS tussentrap en bereikt een grote bandbreedte van 200 MHz. Deze versterker kan werken bij een voedingsspanning van 2.5 V.

ON THE APPLICATION OF INTEGRATED NAVIGATION IN TRAFFIC AND NAVIGATION

E.J. Breeuwer
28 september 1998
Promotor: prof.dr.ir. D. van Willigen

Er zijn twee oorzaken aan te wijzen voor de groeiende belangstelling voor het gebruik van meerdere navigatie hulpmiddelen. In de eerste plaats hebben alle takken van het verkeer en vervoer te maken met een toenemende verkeersdichtheid, bebouwing en frequentieschaarste. De huidige systemen lijken niet opgewassen tegen deze situatie. Een bijkomende factor is het toenemende wantrouwen in satellietnavigatie als het enige navigatiehulpmiddel, aangezien het de gebruiker zeer kwetsbaar maakt door de grote gevoeligheid voor interferentie.

Het doel van deze dissertatie is om het potentieel van geïntegreerde navigatie systemen in verkeer en vervoer te bestuderen. Daarvoor dienen allereerst de operationele eisen in de verschillende transporttakken bekend te zijn. Deze eisen kunnen dan vertaald worden naar een systeemontwerp met behulp van een topdown benadering, die is voorgesteld in het ICAO concept van Required Navigation Performance (RNP). Er wordt een algemene configuratie besproken voor een geïntegreerd navigatiesysteem, dat vervolgens wordt ingevuld voor verschillende integratieniveaus. De besproken RNP ontwerpbenadering wordt toegepast voor het ontwerp van een geïntegreerd navigatiesysteem. Getoond wordt hoe met behulp van een bepaald integratieniveau en de keuze van bepaalde integratietechnieken aan de gebruikerseisen kan worden voldaan. Deze benadering wordt tenslotte toegepast in twee case studies: MIAS en Eurofix.

In hoofdstuk 1 wordt de doelstelling van deze dissertatie uiteengezet. Hoofdstuk 2 introduceert de gebruikerseisen ten aan zien van navigatie- en verkeersbegeleidingssystemen in de verschillende transporttakken. ICAO's RNP concept wordt besproken, waaruit blijkt dat het concept zeer geschikt is om algemene gebruikerseisen te vertalen naar eisen en beperkingen aan navigatiehulpmiddelen. De voornaamste beperking van het huidige RNP concept is dat het hele voertuig wordt beschouwd als een statische puntmassa in de ruimte, waardoor het voldoen aan de RNP eisen nog geen garantie geeft voor een veilige vlucht. Hoofdstuk 3 presenteert een algemeen sensor fusie model inclusief alle noodzakelijke elementen. Dit model wordt in meer detail behandeld voor de beschrijving van de fusie van navigatiesensoren, wat bekend staat als integratie. Het concept van sensor interoperabiliteit wordt besproken, waarna er wordt gedemonstreerd hoe optimaal gebruik kan worden gemaakt van supplementaire en complementaire sensor karakteristieken door integratie. Verschillende Kalman filter configuraties in geïntegreerde navigatie worden besproken, waarbij de nadruk ligt op de operationele toepassing en veiligheidsaspecten met name bij toepassing in de luchtvaart. Vervolgens wordt bekeken onder welke voorwaarden redundantie in geïntegreerde systemen een grotere integriteit oplevert. Tenslotte worden de voor- en nadelen van verschillende niveaus van sensor integratie onder de loep genomen. De algemene conclusie is dat een diepere integratie meestal een hogere nauwkeurigheid oplevert, maar minder wenselijk is vanuit het oogpunt van integriteit en bedrijfszekerheid.

Hoofdstuk 4 beschrijft de eerste casus: de integratie van MLS en DGNSS in het Multi-mode Integrated Approach System (MIAS). In de luchtvaart is behoeft aan een nieuw naderings- en landingshulpmiddel als opvolger van de ILS, waarbij minimaal een vergelijkbare nauwkeurigheid noodzakelijk is. Veiligheidseisen zijn bij voorkeur strenger om het absolute aantal ongelukken niet te vergroten bij een toenemend aantal landingen. Het systeemontwerp moet uit een kostenoogpunt een minimale impact hebben op de infrastructuur op de grond en in het vliegtuig. Om aan de huidige nauwkeurigheidseisen te blijven voldoen wordt MLS als uitgangspunt genomen. Om kosten te minimaliseren wordt uitgegaan van bestaande (deels al bewezen) systemen, MLS en GNSS, waarbij de DGNSS correcties worden verstuurd over de MLS datalink. Nauwkeurigheid wordt gedemonstreerd aan de hand van vliegproefresultaten, terwijl de integriteit en bedrijfszekerheid analytisch wordt onderzocht.

Hoofdstuk 5 beschrijft de tweede casus: de integratie van LORAN-C en DGNSS in Eurofix. Binnen de verschillende transporttakken bestaat behoefte aan een navigatiehulpmiddel met een groot dekkingsgebied, waarbij toepassingen variëren van continentale lucht- en waterwegen tot vliegtuiglandingen. Vanwege de grote prestatieverschillen tussen beide systemen wordt DGNSS als het uitgangspunt genomen, waarbij LORAN-C als een bedrijfszekere back-up dienst doet. Om kosten te minimaliseren wordt wederom gebruik gemaakt van bestaande systemen, namelijk LORAN-C en GNSS, waarbij correcties worden verstuurd door additionele modulatie van het LORAN signaal. De DGNSS prestatie wordt nog verder geoptimaliseerd

door maximaal gebruik te maken van de beschikbare infrastructuur, hetgeen gestaafd wordt door analyse.

De conclusie is dat een goede combinatie van bestaande systemen een antwoord kan bieden aan veel gebruikseisen in de verschillende transporttakken tegen een minimale investering, waarbij tegelijkertijd de kwetsbaarheid van het gebruik van een enkel systeem verdwijnt.

INTELLIGENT FLIGHT CONTROL

A FUZZY LOGIC APROACH

G. Schram
10 november 1998
Promotor: prof.ir. H.B. Verbruggen

Op het gebied van automatische besturingssystemen voor vliegtuigen, zijn *verbetering van de vliegveiligheid* en *vereenvoudiging van het ontwerpproces* twee belangrijke doelstellingen van onderzoek. Door het toenemen van het vliegverkeer, neemt de kans op vliegongelukken toe. Om deze kans te verkleinen en zodoende de vliegveiligheid te verbeteren, is het ontwerp van een besturingssysteem dat onder uitzonderlijke, gevaarlijke omstandigheden goed blijft presteren van belang. Verder kost het ontwerpen van een besturingssysteem veel tijd en geld. Vliegtuigbouwers zijn er dus bij gebaat dat tevens de efficiëntie van het ontwerpproces wordt verbeterd. In de inleiding van dit proefschrift wordt gesteld dat het gebruik van de kennis van ervaren vliegers en ontwerpers in zowel het besturingssysteem als in het daaraan voorafgaande ontwerpproces kan bijdragen tot de verwezenlijking van deze twee doelstellingen. Ervaren vliegers en ontwerpers van besturingssystemen weten immers hoe een vliegtuig bestuurd moet worden in zowel normale als in uitzonderlijke situaties. Deze kennis kan vertaald worden in regelwetten die gebaseerd zijn op *vage logica*. Naast het modeleren van deze kennis, wordt gesteld dat leermechanismen tevens van voordeel kunnen zijn bij het aanleren van nieuwe regelwetten in niet voorziene omstandigheden. Om dit te onderzoeken, wordt het principe van *leren-met-beloning* toegepast.

Het beheersen van een proces met behulp van vage logica ("fuzzy regelen"), is een speciaal type van kennisgebaseerd regelen waarbij de regelwetten als functie van bepaalde condities worden beschreven in de vorm van **als-dan** regels. Logische verbindingswoorden worden gebruikt om kwalitatieve verbanden tussen de variabelen vast te leggen en vage verzamelingen vertalen kwalitatieve termen in numerieke ingangs- en uitgangsvariabelen. In een pure, "linguïstische" vorm van fuzzy regelen, wordt de aanwezige (heuristische) kennis direct vertaald in regels waarbij zowel het **als**-gedeelte als het **dan**-gedeelte bestaan uit linguïstische termen, zoals groot, klein, weinig, enz. In een "analytische" vorm van fuzzy regelen, wordt alleen het conditionele **als**-gedeelte in linguïstische termen omschreven terwijl het **dan**-gedeelte bestaat uit analytische functies die locaal de ingangs-uitgangsrelatie van de regelaar beschrijven. Bij deze laatste vorm van fuzzy regelen, wordt doorgaans eerst het proces gemodelleerd met behulp van een fuzzy model waarbij de aanwezige kennis over het proces gebruikt wordt. Indien gewenst, kan men het fuzzy regelsysteem ook automatisch aanpassen aan veranderende, maar te meten omstandigheden. Een stap verder gaan de zogenaamde leermechanismen. Een speciale vorm is het leren-met-beloning. In dit geval wordt geen enkele voorkennis van het proces en de omgeving verondersteld, en leert het proces met "trial-and-error" nieuwe, gunstige regelwetten. Aan het eind van hoofdstuk 2 worden de principes van fuzzy regelen en het leren-met-beloning gedemonstreerd aan de hand van de besturing van een gesimuleerde satelliet.

In hoofdstuk 3 wordt onderzocht of de linguïstische vorm van fuzzy regelen, gebaseerd op de kennis van ervaren vliegers en ontwerpers, kan bijdragen in een vereenvoudiging van het ontwerpproces. Dit onderzoek is uitgevoerd aan de hand van een ontwerpprobleem dat recentelijk door de vliegtuigindustrie geformuleerd is. De regelaar bestaat uit twee gedeeltes. Het eerste deel, dat de binnen lus vormt ter verbetering van de stabiliteits-eigenschappen, wordt gerealiseerd met behulp van eenvoudige, klassieke besturingstechnieken. Het tweede deel sluit de buitenste lus en bestaat uit fuzzy regels die gebaseerd zijn op eenvoudige heuristieken. In het ontwerpproces, worden de parameters van de regelaar precies ingesteld na evaluatie van enige initiële simulaties. In de fuzzy regelaar worden tevens speciale regels gedefinieerd voor het vliegen met lage snelheid en voor het vliegen met uitval van één der motoren. Dit laat zien dat het inherent aanpassen van de regellusversterking en het toevoegen van regels voor uitzonderlijke vliegsituaties eenvoudig geïmplementeerd kan worden. Resultaten geven aan dat een compromis is gevonden tussen goede vliegprestaties en robuustheid enerzijds en iets te hoge versnellingen anderzijds. De fuzzy regelaar is uitgebreid getest en geëvalueerd ten opzichte van andere regelmethodieken binnen een Europese werkgroep bestaande uit universiteiten, onderzoeksinstellingen en vliegtuigbouwers. De fuzzy re-

gelwetten zijn relatief van lage orde, niet-lineair, deterministisch en eenvoudig te interpreteren (transparant). Daarom worden geen problemen verwacht bij het eventueel certificeren op vliegwaardigheid.

Vele incidenten en fatale ongelukken met vliegtuigen zijn het gevolg van uitzonderlijke weersomstandigheden, zoals de zogenaamde *valwind*. Het kinetische en potentiële energieverlies van een vliegtuig dat gepaard gaat met een plotseling optredende valwind, kan op lage hoogte tot zeer gevaarlijke situaties leiden. In hoofdstuk 4 van dit proefschrift wordt onderzocht of door het toevoegen van speciale regels in het fuzzy besturingssysteem, de kans op een fatale afloop verminderd kan worden. In de eerste plaats wordt extra energie opgebouwd door het automatisch verhogen van het motorvermogen. De aanwezige energie wordt vervolgens verdeeld tussen de snelheid (kinetische energie) en de hoogte (potentiële) energie van het vliegtuig, afhankelijk van bepaalde marges. Deze marges worden bepaald als verschil tussen de snelheid en hoogte met de minimale snelheid waarmee het vliegtuig in de lucht blijft en een minimale hoogte die afhankelijk is van de missie van de vlucht. Impliciet worden door dit protectiemechanisme de versterkingsfactoren in de regelwetten aangepast. Simulatieresultaten laten zien dat door dit automatische protectiemechanisme de veiligheidsmarges zo groot mogelijk blijven en dat de vlucht zodoende vervolgd kan worden.

Een tweede categorie van oorzaken, die kan leiden tot een incident of tot een ongeluk, is het falen van onderdelen in het besturingssysteem, zoals actuatoren en sensoren. De eerste stap om zulke uitzonderlijke situaties aan te pakken, is het detecteren en lokaliseren van de fout. In hoofdstuk 5 worden de verschillende mogelijkheden van foutdetectie en foutdiagnose behandeld. De voordelen van zowel technieken die gebaseerd zijn op vliegtuigmodellen als van technieken die gebaseerd zijn op heuristische kennis, zijn in een nieuw concept gebaseerd op fuzzy modelvorming aanwezig. Deze aanpak heeft vooral voordelen voor processen die beschreven kunnen worden door lineaire vergelijkingen waarvan de parameters variëren als functie van het werkgebied. Fouten in het besturingssysteem worden zowel in type als in grootte geïdentificeerd. Verder is het systeem robuust tegen externe verstoringen en meetruis. De uiteindelijke classificatie van de fouten met behulp van vage verzamelingen kan direct gebruikt worden voor het aanpassen van de regelwetten. Het concept wordt gedemonstreerd aan de hand van simulaties van een vliegtuig met falende actuatoren.

Na foutdetectie en foutdiagnose, moeten de regelwetten worden aangepast zodanig dat de geslotenlus vliegprestaties zoveel mogelijk gehandhaafd blijven. Dit kan in principe op twee manieren. Het eerste principe is gebaseerd op het "projecteren" van het falende element op de overblijvende componenten van het besturingssysteem. Hierbij wordt in het algemeen (snel) overgeschakeld op alternatieve sensoren of actuatoren met bijbehorende regelwetten die van te voren al zijn opgenomen in het besturingssysteem. In het eerste deel van hoofdstuk 6 wordt getoond hoe met behulp van vage logica geleidelijke overgangen en een nauwkeurige interpolatie tussen de verschillende regelwetten bewerkstelligd kunnen worden. De tweede mogelijkheid is het leren van geheel nieuwe regelwetten gedurende de vlucht. Dit kan in principe van nut zijn in het geval van niet voorziene, zeer uitzonderlijke situaties. In het tweede deel van hoofdstuk 6, wordt bestudeerd hoe het leren-met-beloning hierin een rol kan spelen. Het voordeel van dit leermechanisme is dat geen enkele voorkennis (van de foutoorzaak en van het eventueel beschadigde vliegtuig) verondersteld wordt, maar het vinden van de nieuwe regelwetten vereist veel tijd.

In hoofdstuk 7 worden de bijdragen van dit promotieonderzoek in algemene zin samengevat. Het gestructureerd ontwerp van een linguïstische fuzzy regelaar kan ook op andere processen worden toegepast, mits voldoende kennis in de vorm van heuristische regelstrategieën aanwezig is. Verder is aangetoond hoe de versterkingsfactoren van de regelwetten impliciet aangepast kunnen worden en hoe speciale regels/procedures ingebouwd kunnen worden in de fuzzy regelaar. In de context van foutdetectie en foutdiagnose, levert vage logica in combinatie met analytische procesmodellen een algemeen concept dat van toepassing kan zijn op niet-lineaire processen. Het classificeren van de fout met behulp van vage verzamelingen, is verder van belang bij het aanpassen van de regelwetten. Het leren–met-beloning kan van toepassing zijn bij het aanpassen van een regelaar die al goed geïnitialiseerd is. Tevens biedt leren-met-beloning een interessant concept voor het leren van nieuwe regelwetten in onbekende situaties.

Terugkerend naar de twee doelstellingen, kunnen we het volgende concluderen. In de eerste plaats biedt het kennis-gebaseerd regelen met behulp van vage logica een methodiek die qua prestaties niet onderdoet in vergelijking met alternatieve regelmethodieken. De complexiteit is laag en de structuur van de regelaar is eenvoudig te interpreteren door het gebruik van linguïstische regels en vage verzamelingen. Echter, omdat het instellen van de parameters van de fuzzy

regelaar toch enige ervaring en tijd vergt, draagt de methodiek slechts gedeeltelijk bij aan het vereenvoudigen van het ontwerpproces. Tevens is een wiskundige analyse van het gesloten-lus systeem moeilijk te geven omdat de fuzzy regelaar een niet-lineaire ingangs-uitgangsrelatie beschrijft. Dit probleem treedt overigens op bij alle niet-lineaire regelwetten en systemen. Wat de tweede doelstelling betreft, biedt het gebruik van een fuzzy regel- en beslisconcept een natuurlijk raamwerk voor het implementeren van speciale regels en procedures in het geval van uitzonderlijke situaties zoals valwinden en falende onderdelen. Dit kan in de praktijk tot een verbetering van de vliegveiligheid leiden. Van bijzonder voordeel zijn de geleidelijke overgangen en de nauwkeurige interpolatie tussen de verschillende regelwetten. Verder biedt de combinatie van model-gebaseerde en kennis-gebaseerde technieken een robuust systeem voor foutdetectie en foutdiagnose. Als laatste biedt het leren-met-beloning in principe de mogelijkheid om in volstrekt onbekende (gevaarlijke) situaties nieuwe regelwetten te leren.

Verder onderzoek wordt gesuggereerd in de richting van het toepassen van het analytische type van fuzzy regelaars op vliegtuigbesturing waarbij analytische modelkennis met heuristische kennis gecombineerd kan worden. Dit zou gepaard moeten gaan met een, voor zover mogelijk, geautomatiseerd ontwerpproces met behulp van optimalisatie technieken. Het ontsnappen uit uitzonderlijke, onvoorziene situaties met leertechnieken zou tevens een punt van verder onderzoek kunnen zijn. Aansluitend op het foutdetectie en foutdiagnose systeem, is onderzoek in de richting van een expert systeem voor een meer diepgaande diagnose van de foutoorzaak van belang. Vervolgonderzoek van meer praktische aard zou zich kunnen richten op het implementeren van het automatisch aanpassen van regelparameters, locale foutdetectie en foutdiagnose van componenten van het besturingssysteem, en het automatisch aanpassen van de regelwetten in het geval van uitzonderlijke maar voorziene weersomstandigheden en fouten in het besturingssysteem.

FUZZY DECISION MAKING WITH CONTROL APPLICATIONS

U. Kaymak
23 november 1998
Promotor: prof.ir. H.B. Verbruggen

De besliskunde en de regeltechniek zijn twee aan elkaar gerelateerde gebieden. Een regelaar kan worden opgevat als een beslisser die bepaalt welke regelacties moeten worden doorgegeven aan het geregelde systeem (het proces). De beslissing wordt gebaseerd op informatie omtrent de gestelde eisen, de regelomgeving en het geregelde proces. Ondanks de relatie tussen het regelen van een proces en het nemen van beslissingen, worden de methoden vanuit de beslistheorie vaak niet gebruikt in de regeltechniek. De regeltechniek heeft een eigen verzameling van gereedschappen, oplossingsmethoden en theorema's ontwikkeld voor het ontwerpen van regelsystemen. Andersom worden de resultaten vanuit de regeltheorie niet gebruikt bij het oplossen van beslisproblemen. Ook de kruisbestuiving tussen vage regelingen en vage beslissingen is nog gering. De vage beslistheorie past de theorie der vage verzamelingen toe op beslisproblemen met niet probabilistische onzekerheid, linguïstische vaagheid en subjectieve informatie. Dit soort informatie komt bij beslisproblemen vaak voor. Vanwege de veranderingen in de productieprocessen en de strengere eisen gesteld aan de geautomatiseerde regelsystemen moet bij het ontwerp van vele moderne regelsystemen steeds meer rekening worden gehouden met de niet-lineariteit van het systeem, de onzekerheid in de procesmodellen, de interactie met mensen in de regellussen en de subjectieve evaluatie van de prestaties van de regelaar. De problemen bij het ontwerpen van regelsystemen tonen steeds meer verwantschap met die welke voorkomen bij het nemen van beslissingen. Bij het ontwerpen van deze regelsystemen moet men ook meer rekening houden met methoden die bij het nemen van beslissingen worden toegepast. Dit proefschrift bestudeert hoe vage beslismethoden kunnen worden toegepast bij het oplossen van regelproblemen zodat de vage besliskunde en de vage regeltechniek op een synergetische manier worden gecombineerd.

Het grootste deel van dit proefschrift bestudeert vage beslissingen die zijn geformuleerd als discrete keuze problemen. Het discrete keuzeprobleem wordt gekarakteriseerd door een eindige en aftelbare verzameling van alternatieven die in een voorkeursvolgorde worden gezet door het bekijken van een eindige en aftelbare verzameling criteria. De alternatieven wor-

den geëvalueerd voor ieder besliscriterium, en de mate waarin ieder alternatief aan ieder criterium voldoet, wordt bepaald. Bij vage besliskunde worden de beslisdoelen voor ieder criterium gerepresenteerd als een vage verzameling. De alternatieven worden dan geëvalueerd volgens hun lidmaatschap van het beslisdoel. Als ieder alternatief geëvalueerd is voor ieder criterium en de lidmaatschappen van de beslisdoelen zijn bepaald, worden deze lidmaatschapswaarden gecombineerd om de lidmaatschap van de gewenste beslisverzameling te bepalen. Deze combinatie geschiedt door de lidmaatschapswaarden te aggregeren door middel van een aggregatiefunctie. De geaggregeerde waarden uit de aggregatiefunctie bepalen de volgorde van de beslisalternatieven waarbij een grote geaggregeerde waarde een beter beslisalternatief impliceert.

Vage beslissingen worden vaak geformuleerd volgens de aanpak van Bellman en Zadeb. In hun benadering worden zowel de beslisdoelen als de beperkingen van het beslisprobleem weergegeven als besliscriteria. De evaluatie van de besliscriteria gebeurt door het bepalen van de lidmaatschapswaarde van een alternatief van de vage verzameling die het beslisdoel en/of de beslisbeperking beschrijft. In deze zin worden de vage doelen en de vage beperkingen behandeld op een vergelijkbare manier door middel van lidmaatschapsfuncties. Hierdoor neemt de symmetrie in het beslisprobleem toe, d.w.z. de beslisdoelen en de beslisbeperkingen worden op gelijke wijze beschouwd.

Een belangrijk onderdeel van vaag beslissen is het specificeren van de aggregatieoperator die wordt gebruikt voor het combineren van de informatie omtrent de beslissing. De aggregatieoperator is een wiskundige vertaling van het subjectieve beslisgedrag van de beslisser voor het betreffende probleem. Deze operator moet de verschillende beperkingen en doelen combineren met subjectieve afwegingen. Diverse vage aggregatieoperatoren zijn bestudeerd in de literatuur. De meest gebruikte zijn de t-normen voor het modelleren van de conjunctieve aggregatie van de criteria, de t-conormen voor het modelleren van de disjunctieve aggregatie van de criteria en de middelingoperatoren voor het modelleren van compromissen tussen de besliscriteria. Gegeneraliseerde versies van deze operatoren zijn ook voorgesteld. Toch worden deze nog zelden toegepast. De vage aggregatieoperatoren modelleren slechts een enkel type aggregatiegedrag. Als de relaties tussen de criteria (en begrenzingen) gecompliceerd zijn, kunnen deze criteria in deelverzamelingen worden gesplitst. Binnen elke deelverzameling kunnen verschillende aggregatieoperatoren worden toegepast. Vervolgens worden de delen gecombineerd door een opnieuw te kiezen aggregatieoperator. Op deze manier krijgt men hiërarchieën van aggregatieoperatoren die een willekeurige type aggregatie kunnen modelleren mits er voldoende niveaus voor de tussenaggregatie zijn genomen.

Een geometrische interpretatie van het vaag beslissen is gegeven in dit proefschrift. Gegeven m besliscriteria, kunnen de evaluaties voor de beslisalternatieven voorgesteld worden als een punt in $\Re^m$. De aggregatiefunctie is een afbeelding $D : \Re^m \longrightarrow \Re$ zodanig dat de ordening van alternatieven op $\Re$ de preferentievolgorde van de alternatieven bepaalt. De geometrische interpretatie is nuttig voor het analyseren van het type aggregatie dat wordt gebruikt in de vage beslissing, en voor het analyseren van de relaties tussen diverse typen aggregatie. Het laat bijvoorbeeld zien dat de conjunctieve aggregatie en de disjunctieve aggregatie verschillen in de referentiepunten waarmee de alternatieven worden vergeleken. Het referentiepunt bij de conjunctieve aggregatie is het slechtst denkbare alternatief (het anti-ideaal), en het referentiepunt bij de disjunctieve aggregatie is het best denkbare alternatief (het ideaal).

De besliscriteria zijn vaak niet alle even belangrijk voor het bestudeerde beslisprobleem. Het verschil in het belang van de criteria wordt gemodelleerd door het gebruik van gewichtsfactoren. De aggregatieoperator moet de gewichten van de criteria in rekening brengen om de geaggregeerde waarde te bepalen. De geometrische interpretatie van het vage beslisprobleem laat twee algemene manieren zien om de gewichtsfactoren mee te nemen. Ten eerste kunnen de lidmaatschapswaarden voor de evaluaties gemodificeerd worden door de gewichtsfactoren, waarna de gemodificeerde lidmaatschapswaarden geaggregeerd worden door het gebruik van de oorspronkelijk niet-gewogen aggregatie operator. Deze aanpak wordt *het transformeren van de alternatieven* genoemd. Ten tweede kan de aggregatieoperator zelf worden gemodificeerd. Deze methode wordt *het transformeren van de aggregatiefunctie* genoemd. In deze methode wordt de verandering in het aggregatiegedrag ten gevolge van de gewichtfactoren waargenomen door de veranderingen in de contourlijnen van de bestudeerde aggregatieoperator

Dit proefschrift laat zien dat de incorporatie van de gewichtsfactoren in de aggregatiestap op een consistente wijze kan worden bestudeerd door het gebruik van een gevoeligheidsanalyse. In deze benadering is een gewichtscoëfficiënt geïnterpreteerd als een factor die de bijdrage van een bepaald criterium aan de algemeen geaggregeerde waarde beïnvloedt. Een aantal

voorwaarden waaraan een gewogen aggregatiefunctie moet voldoen kunnen dan worden gedefinieerd. Door het nagaan of een voorgestelde gewogen aggregatiefunctie aan de vereiste condities voldoet kan men de aanvaardbare manieren voor het invoeren van de gewichtsfactoren en de specifieke voorwaarden waaronder deze geldig zijn bestuderen. Deze analyse heeft geleid tot een algemene methode om gewichtsfactoren te introduceren bij een breed scala van aggregatieoperatoren die bestaan uit Archimedische t-normen, Archimedische t-conormen, algemene gemiddelde operatoren, duale gemiddelde operatoren, compenserende operatoren of associatieve compenserende operatoren. Deze generalisatie is gebaseerd op de methode van het transformeren van de aggregatiefunctie. Als een alternatief kan de methode van het transformeren van de beslisalternatieven ook worden gebruikt in specifieke gevallen afhankelijk van de gebruikte aggregatieoperator, de geaggregeerde lidmaatschapswaarden en de gewichtsfactoren. De gevoeligheidsanalyse duidt aan onder welke condities de methode van het transformeren van de aggregatiefunctie equivalent is aan de methode van het transformeren van de beslisalternatieven.

De aggregatiefunctie neemt een centrale plaats in bij vage beslissingen mede omdat het een vertaling is van de algemene beslisdoelen en de beperkingen, en de subjectieve voorkeuren van de beslisser naar een wiskundige representatie. Het selecteren van de aggregatieoperator is dus een belangrijk stap in de beslisprocedure. Vooral als mensen zijn betrokken vereist de vertaling in een doelfunctie van de doelen die op een linguïstische manier zijn gespecificeerd extra aandacht. Gebaseerd op data uit experimenten die eerder zijn gepubliceerd in de literatuur heeft dit proefschrift de conjunctieve aggregatie van informatie door mensen beschouwd. Als men expliciet de kardinale ordening beschouwt, observeert men een compensatorisch aggregatiegedrag. Naast de aggregatieoperatoren die eerder zijn voorgesteld in de literatuur om dit gedrag te modelleren wordt in dit proefschrift aangetoond dat de algemene gemiddelde operator ook kan worden gebruikt om compensatorisch beslisgedrag te modelleren. Een klein experiment heeft aangetoond dat de evaluatie van de responsie van een regelaar door mensen ook het compensatorische aggregatiegedrag vertoont. Echter, als de data worden bekeken in termen van de ordening van de alternatieven wordt het compensatorische gedrag niet meer waargenomen. Dan kan men een breed scala van aggregatieoperatoren gebruiken inclusief de conjunctieve en de disjunctieve aggregatieoperatoren. In dat geval wordt de selectie van de aggregatieoperator bepaald door toegevoegde informatie over het beslisprobleem, de beslisomgeving en de beslisser.

Het vage beslisprobleem is vastgelegd als de lidmaatschapswaarden en de gewichtsfactoren zijn bepaald en de beslisfunctie is gekozen. Een aantal methoden zijn beschikbaar om de lidmaatschapswaarden en de gewichtsfactoren te verkrijgen. Een methode die vooral geschikt is voor het bepalen van de gewichtsfactoren is het Analytic Hierarchy Process (AHP) dat is gebaseerd op paarsgewijze vergelijkingen. Echter, omdat de alternatieven of de criteria paarsgewijs worden vergeleken kan er inconsistentie optreden tussen de verschillende vergelijkingen. Met de aanname dat de inconsistentie optreedt als gevolg van slechts een klein aantal fouten tijdens het vergelijkingsproces is de DELAIN methode geïntroduceerd. De DELAIN methode kan worden gebruikt voor het analyseren van inconsistentie tussen de paarsgewijze vergelijkingen. De analyse is vergelijkbaar met de foutdetecterende en foutcorrigerende codes in de informatietheorie, en kan worden gebruikt voor het verbeteren van de beslissing door het bekijken van de invloed van foutieve inconsistentie op de paarsgewijze vergelijkingen.

Vanwege de relatie tussen beslissen en regelen kunnen vage beslismethoden ook worden gebruikt voor het regelen van processen. De vage beslismethode kan vooral worden toegepast voor het modelleren van flexibele beperkingen alsmede voor een transparante vertaling van doelen en subjectieve voorkeuren van de ontwerper in een wiskundige voorstelling van de regelaar. In dit onderzoek zijn toepassingen onderzocht van vage beslismethoden voor het ontwerpen van directe regelaars en het optimaliseren in het model gebaseerd regelen. Vage geaggregeerde lidmaatschap (FAME) regelaars worden verkregen door in een regelprobleem direct de gelijkenis interpretatie van het vaag beslissen toe te passen. De FAME regelaars kunnen worden toegepast als directe regelaars en ook als toezichthoudende regelaars, die de parameters van de directe regelaars adapteren om de regelresponsie te verbeteren.

In tegenstelling tot de conventionele vage regelaars waarvan de niet-lineariteit bestaat uit een aantal elkaar beïnvloedende factoren, die niet expliciet kunnen worden gespecificeerd, kan men de niet-lineariteit van een FAME regelaar expliciet specificeren. Hierdoor kan de niet-lineariteit van de FAME regelaar meer inzichtelijk worden bestudeerd, en kan deze worden afgestemd op de niet-lineariteit van het proces teneinde de regelresponsie te verbeteren. De FAME regelaars gebruiken aggregatieoperatoren uit de vage beslistheorie. Er wordt één vage verzameling per ingang gebruikt om de

uitgangen te bepalen. Het afstemmen van de regelaar vergt minder moeite vanwege het gereduceerd aantal parameters en het feit dat de FAME regelaars zijn gebaseerd op de aggregatieoperatoren waarvan de eigenschappen goed bekend zijn uit de vage verzamelingentheorie. De regelaar kan echter alleen die afbeeldingen genereren die kunnen worden "ontbonden" in functies van één variabele. Hierdoor is een FAME regelaar minder algemeen dan een conventionele vage regelaar De berekeningen van FAME regelaars vergen echter minder rekencapaciteit.

In een andere benadering combineert het vaag voorspellend regelen het model gebaseerd regelen met technieken uit vaag multicriteria beslissen. Door gebruik van vage beslismethoden kunnen linguïstische regeldoelen worden vertaald op een transparante manier naar een doel functie die wordt gebruikt voor een voorspellend regelalgoritme. De beslissingen van het voorspellend regelalgoritme bestrijken een opeenvolging van regelacties in meer stappen. Het beslissen is dus meerstaps. Bij de vage beslissingen in dit proefschrift is de voorspelde responsie van het systeem beschouwd over een aantal regelstappen en de doelfunctie combineert deze informatie. Dit verandert een meerstaps beslisprobleem in een enkelstaps beslissing.

De keus van de beslisfunctie heeft een significante invloed op de regelresponsie bij vaag voorspellend regelen. Vaak is de responsie van een vaag voorspellende regeling superieur in vergelijking met de responsie van een conventioneel voorspellende regeling. Dit komt door de additionele vrijheid bij de specificatie van een doelfunctie die hierdoor beter kan aansluiten op het regelprobleem. Vooral de rol van de lidmaatschapsfuncties die de besliscriteria beschrijven is uniek bij het vaag voorspellend regelen omdat zij diverse regelgrootheden transformeren naar een verenigde ruimte waarbinnen verschillende grootheden met elkaar kunnen worden vergeleken. Een dergelijk mechanisme is moeilijker om te implementeren zonder het gebruik van een concept zoals de lidmaatschapsfunctie.

Een veelbelovend onderwerp waarbij het model gebaseerd voorspellend regelen nuttig gebruik maakt van de vage beslismethoden is het specificeren van de doelfunctie van de regelaar door gebruik te maken van de kennis van deskundigen. Het ontwerpen van een doelfunctie vanuit expert kennis is aangetoond door het gebruik van de simulatie van een containerkraan als voorbeeld. Deze benadering gebruikt de gewogen en de parametrische beslisfuncties die in dit proefschrift zijn bestudeerd.

Het laatste deel van dit proefschrift beschouwt de toepassing van vaag multicriteria beslissen bij het bepalen van een correct aantal clusters bij het vaag clusteren, bij het defuzzificeren van vage verzamelingen en bij het ontwerpen van elektromagnetische componenten.

Vaag clusteren is een belangrijke methode die wordt gebruikt om vage modellen te verkrijgen. Het reduceren van het aantal regels in de modellen is gerelateerd aan het reduceren van het aantal clusters in de data. De methode van het samenvoegen van clusters bepaalt het aantal clusters in de data door het samenvoegen van de compatibele clusters bij het clusteringalgoritme van Gustafson en Kessel. De beslissing voor de compatibiliteit van de clusters wordt genomen met behulp van vaag multicriteria beslissen.

Vaak worden de uitgangen van de vage systemen gedefuzzificeerd om ze toe te passen in niet-vage systemen. Het defuzzificeren kan gezien worden als het selecteren van een scherp waarde die een gegeven vage verzameling het beste representeert. De defuzzificatie operator moet worden gekozen om aan de doelen van het systeem te voldoen. De aggregatieoperatoren uit de vage verzamelingentheorie kunnen worden gemodificeerd om de defuzzificatie van een vage verzameling te bepalen. Door het toepassen van deze benadering is de COGUS defuzzificatie geïntroduceerd waarbij de defuzzificatie operator in verschillende mate gevoelig is voor de elementen van de verzameling. Als voorbeeld is deze defuzzificatie methode toegepast bij de veiligheidsanalyse van transmissienetwerken in de elektriciteitvoorziening.

Het ontwerpen van een systeem is een typisch voorbeeld waarbij moet worden voldaan aan een soms groot aantal verschillende ontwerpcriteria. Veel ontwerpproblemen vereisen een combinatie van conventionele beperkingen, flexibele beperkingen en doelen van de ontwerpers. Vaag beslissen is een nuttig gereedschap voor het modelleren van de aggregatie van informatie omtrent alle criteria. Dit concept is gedemonstreerd door een prototype beslissingsondersteuningsysteem gebaseerd op vage beslissingen. Het systeem assisteert de ontwerper van elektromagnetische componenten tijdens het ontwerpen van inductiespoelen.

Men kan concluderen dat vage multicriteria beslismethoden kunnen worden toegepast op een succesvolle manier bij het ontwerpen van regelsystemen en bij het verbeteren van regelresponsies. De aggregatiefuncties die worden gebruikt als beslisfuncties kunnen worden toegepast voor het ontwerpen van niet-lineaire directe regelaars. Daarnaast kunnen vage beslismethoden worden gebruikt voor het optimaliseren in model gebaseerd

regelen. De regelacties worden dan gekozen afhankelijk van de toestand van het geregelde systeem en de doelen van de regelaar. De kennis omtrent beslisfuncties kan worden gebruikt om doelfuncties te ontwerpen die de subjectieve doelen en de regelstrategie van een menselijke toezichthouder vertalen naar een wiskundige representatie. De toepassing van beslismethoden in de regeltechniek wordt bevorderd door een uitgebreide analyse van het beslisprobleem. De geometrische interpretatie van het beslisproces, de gevoeligheidsanalyse voor de gewichtsfactoren en de begripsvorming over de sleutelfactoren voor het kiezen van de aggregatiefunctie vergemakkelijkt de toepassing van vage beslismethoden bij het ontwerpen van regelsystemen of bij het oplossen van regelproblemen.

FROM DIFFERENTIABLE MANIFOLDS TO INTERACTIVE ROBOT CONTROL

S. Stramigioli
4 december 1998
Promotors: prof.ir. G. Honderd
prof.dr. G.J. Olsder

Dit proefschrift behandelt modelvorming en regeling van mechanische interactieve systemen.

Allereerst behandelen we een kader om rigide mechanismen te modelleren; we kijken zowel naar de kinematica als naar de dynamica en accentueren met name de natuurkundige interconnectie van de mechanische delen.

Vervolgens bespreken we een kader om te beschrijven wat er bedoelt wordt met controle van interactie. Dit gedeelte laat de resultaten zien van (Stramigioli, Fasse, and Willems 1997). De auteur beschouwt dit kader als belangrijk aangezien in de literatuur, het verschil tussen kracht-regelaars en interactieve regelaars, zoals impedantie-regelaars, nog niet volledig duidelijk lijkt te zijn (Won, Stramigioli, and Hogan 1997).

Hoe men regeling dient te omschrijven door middel van een vermogen-continue inter-connectie wordt geïntroduceerd (Stramigioli, Maschke, and van der Schaft 1998), met als voorbeeld een toepassing van "*damping injection*" door middel van een dynamische extensie (Stramigioli 1996a). Het concept van "*Intrinsically passive control*" wordt ook voorgesteld. Dit concept is fundamenteel voor de regeling van robots die interageren met een ongestructureerde omgeving.

Een complexere toepassing van een nieuwe grijp strategie wordt dan in detail behandeld. De resulterende geometrische, intrinsieke passieve regelaar laat zien gelijk te zijn aan de inter-connectie van een set van natuurkundige passieve mechanische drie dimensionale elementen (Stramigioli 1998b).

We verschaffen ook een nieuwe software architectuur die het natuurkundige concept van superpositie van passieve elementen gebruikt als een verenigende strategie voor een "multi-agent" architectuur (Stramigioli, Beccari, and van der Ham 1995; Beccari, Stramigioli, Jonglund, and Caselli 1996; Beccari and Stramigioli 1998).

Tenslotte eindigt het werk met de presentatie van twee toepassingen. De eerste implementeert een assemblage taak genaamd "zwaluwstaart insertie". Deze taak wordt afgerond door gebruik te maken van een eenvoudige interactieve strategie die sneller is dan de eerdere technieken (Klomp 1994) en die minder beperkt is in de precisie die nodig is voor metingen. De tweede toepassing wordt gedaan in samenwerking met het onderzoekslaboratorium van Unielever Research Lab te Vlaardingen, Nederland. Het doel van dit project is om een wendbare interactieve regelstrategie te implementeren op een parallelle robot. Het project resulteert in een wendbaar verpakkingssysteem: het is in staat om bepaalde assemblage taken te volbrengen voor de voedingsindustrie terwijl de tolerantie van de metingen van de geassembleerde delen verlicht is en er is een cyclus tijd van ongeveer een halve seconde (de Krijger, van Luenen, Pedersen, and Stramigioli 1997).

FUZZY PROBABILISTIC LEARNING AND REASONING

G.C. v.d. Eijkel
18 Januari 1999
Promotor: prof.dr.ir. E. Backer

Dit proefschrift behandelt het probleem van kennisacquisitie voor beslisondersteuning in veeleisende omgevingen. In veeleisende omgevingen is het noodzakelijk om expliciete kennis te verkrijgen waarmee de juiste beslissingen kunnen worden genomen en kunnen worden uitgelegd. Deze kennis kan gebruikt worden in een beslisondersteuningssysteem om het besluitvormingsproces van experts te verbeteren. Een voorbeeld van een veeleisende omgeving is de patiëntbewaking in de anesthesie, hetgeen onderwerp van studie is geweest in het intelligente anesthesie-monitor project van de Technische Universiteit Delft in samenwerking met het Academisch Medisch Centrum in Amsterdam. Dit project heeft veel van het werk in dit proefschrift gestimuleerd.

De aanpak voor kennisacquisitie in dit proefschrift is gebaseerd op het leren van regels uit voorbeelden. Er wordt beargumenteerd dat het resultaat van leren een set regels moet zijn die enerzijds goed past bij de data (voorbeelden) van het beslisprobleem (data-fit) en anderzijds past bij het referentiekader van de expert (mentale-fit). De reden hiervoor is dat beide aspecten noodzakelijk zijn voor het maken van en uitleggen van de juiste beslissingen. Hiertoe wordt een synthese gemaakt tussen kansdichtheidschatting, dat een nadruk heeft op data-fit, en vage regelinductie, dat een nadruk heeft op mentale-fit. Om deze synthese mogelijk te maken is een generiek raamwerk voor onzekerheidscalculus ontwikkeld: de vage kansrekening. Do vage kansrekening is gebaseerd op de kans op een vage gebeurtenis en is zeer geschikt voor leren en redeneren met onzekerheid. Deze vage kansrekening is een van de belangrijke bijdragen van dit proefschrift.

Een van de validaties voor de vage kansrekening is dat een nieuwe en efficiënte kernel-gebaseerde dichtheid schatter kan worden afgeleid: de dubbele-kernel schatter. Er wordt aangetoond hoe deze schatter wiskundig samenhangt met de welbekende Parzen schatter. Experimenten laten zien dat de dubbele-kernel schatter in beslisproblemen (zoals classificatie) nauwkeuriger kan zijn met minder kernels dan de Parzen schatter. De dubbele-kernel schatter is een van de interessante additionele bijdragen van dit proefschrift.

Nog een belangrijke bijdrage van dit proefschrift is een nieuw regelinductie algoritme: "Fuzzy Probabilistic Rule Induction". Dit algoritme, gebaseerd op de vage kansrekening, volgt het "covering-paradigma"voor regelinductie. Do regels worden geselecteerd met behulp van de J-informatiemaat, welke gerelateerd is aan de wederzijdse informatie die ook wordt gebruikt voor het opstellen van beslisbomen. Experimenten met een implementatie van dit algoritme genaamd FILER laten zien dat, in vergelijking met andere algoritmen, zeer nauwkeurige beslissingen kunnen worden genomen die met slechts weinig algemene regels kunnen worden uitgelegd. Het blijft echter een probleem om met generieke regels rekening te houden met de covariantie van de data. Zonder generalisatie kan deze covariantie weliswaar worden meegenomen maar dan degenereert de regelinductie op basis van de vage kansrekening tot de dubbele-kernel schatter techniek.

De uiteindelijke bijdrage van dit proefschrift is de toepassing van de regelinductie op basis van de vage kansrekening voor patiëntbewaking in do anesthesie. Bewaking in de anesthesie is een voorbeeld van een veeleisende omgeving waarin veel bronnen van complexe informatie moeten worden verwerkt in een relatief kort tijdsbestek. Een complicerende factor in de patiëntbewaking is de tijdsafhankelijkheid van de fysiologische signalen. De aanpak die wordt gevolgd in dit proefschrift is het representeren van de veranderingen van de parameters in de tijd door een aantal trends. Op basis van deze trends en andere kenmerken kunnen regels geleerd worden uit voorbeelden van "alarm" situaties verkregen van experts. Met deze regels is het mogelijk dat een systeem redeneert zodat (1) de anesthesist gewaarschuwd kan worden en (2) een uitleg gegeven kan worden voor een dergelijke waarschuwing. Een case-study wordt behandeld waarin op basis van ongeveer 1000 voorbeelden, verkregen met toestemming van de Rijksuniversiteit Groningen, ongeveer 40 regels worden afgeleid. Op grond van cross-validation wordt bepaald dat de regels bijna 80 % van de niet geobserveerde voorbeelden op juiste wijze zouden moeten kunnen herkennen en zinvol kunnen uitleggen. Een panel van experts bevestigde dat dit de verwachte prestatie zijn van een expert en tevens konden zij zich vinden in vele door het systeem geleerde generieke regels. Op basis van deze resultaten wordt geconcludeerd dat de regelinductie op basis van de vage kansrekening een bruikbare techniek is voor een beslisondersteuningssysteem in de anesthesie. De uiteindelijke prestatie van het systeem hangt echter af van de kwaliteit van de voorbeelden die door de expert worden gegeven.

BIOMEDICAL WAVEFORM VALIDATION

H.J.L.M. Vullings
4 mei 1999
Promotors: prof.ir. H.B. Verbruggen
prof.dr.ir. J. Biemond

In 1994 begon een drietal AiO's (Philip de Graaf, Gerard van den Eijkel en de auteur) aan het Intelligente Anesthesie Monitor project. Een anesthesie monitor toont tijdens een operatie verscheidene signalen, zoals het elektrocardiogram (ECG) en de bloeddruksignalen, en een aantal parameters bijvoorbeeld de hartslag. Samen geven zij de anesthesioloog een goed beeld van de toestand van de patiënt. Vaak is het echter moeilijk om al die informatie te interpreteren, en wij onderscheidden drie deelgebieden waarin de monitor verbeterd kon worden: de validatie van de gemeten golfvormen (data), de manier waarop een anesthesioloog gewaarschuwd wordt en het omgaan met de op de monitor getoonde informatie. Dit proefschrift concentreert

zich slechts op het eerste aspect, het valideren van de data.

Golfvorm validatie, dat wil zeggen het onderscheiden van valide (nuttige) en niet valide data, is om drie redenen belangrijk. Ten eerste om het aantal foutieve alarmen (*false alarms*) te reduceren. Bedenk hierbij dat tot op heden slechts 3% van alle monitor alarmen zinvol zijn. Ten tweede om elektronische boekhouding in de anesthesie mogelijk te maken. en tenslotte om het interpreteren van de data door de anesthesioloog te vereenvoudigen.

We tonen dat golfvorm validatie en classificatie soortgelijke concepten zijn: beide geven een label aan de data, waarbij de eerste methode slechts twee klasses onderscheidt, valide en niet valide, en de andere eventueel meerdere klasses. Alhoewel beide methoden op elkaar lijken is er toch bijna geen onderzoek gedaan naar golfvorm validatie, zodat we onze eigen methode hiervoor dienden te ontwikkelen. Aangezien alle gemeten signalen van quasi-periodieke aard zijn ontwierpen wij een schema dat de golfvormen van nieuwe data vergelijkt met die van valide data (uit een database of gegeven door een anesthesioloog). Wanneer nu het verschil tussen de nieuwe data en de valide data te groot wordt dan wordt de nieuwe data als niet valide gemarkeerd. Om deze aanpak te laten werken hadden we een methode nodig om golfvormen te vergelijken. Een literatuuronderzoek bracht een drietal methoden aan de oppervlakte die zinvol leken voor validatie: syntactische grammatica's, 'hidden Markov models' (HMM) en kunstmatige neurale netwerken (ANN). Ze hadden echter allemaal hun beperkingen: de eerste sloegen vaak een stuk van het signaal over, HMMs zijn moeilijk te initialiseren en ANNs vereisen veel rekentijd. Daarom ontwikkelden wij een generieke methode gebaseerd op 'dynamic time warping', die gebruikt kan worden voor verschillende soorten van quasi-periodieke signalen. Deze methode is eenvoudig te initialiseren, aangezien ze slechts enkele graden van vrijheid heeft; verder neemt ze het hele signaal mee, en maakt ze gebruik van voorbeelden bij het vergelijken.

Het grootste deel van dit proefschrift is gewijd aan het beschrijven en testen van deze methode. Alhoewel de meeste tests zijn uitgevoerd op het ECG, omdat dit signaal beschikbaar was, tonen we ook aan dat deze methode toegepast kan worden op andere signalen, bijvoorbeeld om 'crackles' in geluidsopnamen van de longen te detecteren. (Crackles klinken als voetstappen in verse sneeuw, en zijn een indicatie van schade aan de longen). In onze experimenten konden we ongeveer 80% van alle crackles detecteren. Verder tonen we aan dat onze methode gebruikt kan worden om golfvormen te valideren, waarbij de overeenkomst tussen expert en algoritme 90% bedroeg (met een gevoeligheid van 75%), maar ook voor golfvorm classificatie en voor de detectie van bepaalde punten in het ECG. Tenslotte is het onze opinie dat de eenvoud van implementatie en het brede terrein van toepassing onze methode een goed alternatief maken, alhoewel er voor deelgebieden misschien wel methoden zijn die betere resultaten behalen.

ORIGINS OF OFFSET IN CONVENTIONAL AND SPINNING-CURRENT HALL PLATES

Mw. A.A. Bellekom
5 oktober 1998
Promotor: prof.dr.ir.em. S. Middelhoek

Hall platen zijn populaire magnetische sensoren. Magnetische sensoren meten de sterkte en/of de richting van een magnetisch veld. Er zijn verschillende soorten magnetische sensoren ontwikkeld, gebaseerd op verschillende fysische effecten. Een veel gebruikte sensor is de Hall plaat, gebaseerd op het Hall effect. Het belangrijkste voordeel van Hall platen is dat ze, in vergelijking tot ander magnetische sensoren, goedkoop en eenvoudig gefabriceerd kunnen worden in een standaard IC proces. Zulke geïntegreerde Hall platen hebben echter een belangrijk nadeel: ze vertonen een grote, onvoorspelbare offset. Offset is de uitgang van de sensor in afwezigheid van een magnetisch veld.

Om de offset te verminderen zijn zogenaamde spinning-current Hall platen ontwikkeld. Een spinning-current Hall plaat is een symmetrische Hall plaat waardoor de stuurstroom in verschillende richtingen kan lopen. Als een spinning-current Hall plaat met acht contacten wordt gebruikt, verandert de hoek van de struurstroom van 0 tot 2π in stappen van $\pi/4$. De corresponderende acht uitgangsspanningen worden gemiddeld om zo het uiteindelijke uitgangssignaal van de spinning-current Hall plaat te verkrijgen. De uiteindelijke offset van spinning-current Hall platen is heel klein. Het doel van dit proefschrift is het bepalen van de invloed van het fabricage proces, de stuurstroom, de stuurspanning, de substraatspanning, de temperatuur en het kristalvlak, op de offset van geïntegreerde conventionele en spinning-current Hall platen.

Om dit doel te bereiken zijn theoretische modellen ontwikkeld en experimenten uitgevoerd.

Theoretische modellen De effectieve dikte van geïntegreerde Hall platen wordt beïnvloed door de stuurstroom, stuurspanning en substraatspanning. Gebruikmakend van dit "effectieve-dikte-model" is de gevoeligheid en de weerstand van Hall platen berekend, als functie van deze variabelen.

Met behulp van het "draaiende-Wheatstone-brug-model" is de offset bepaald die veroorzaakt wordt door mechanische spanning in de Hall plaat. Dit is de belangrijkste bron van offset in geïntegreerde Hall platen. Het model voorspelt dat Hall platen die in het (110) vlak van silicium worden gemaakt een veel grotere offset zullen hebben dan Hall platen gefabriceerd in het (100) of (111) vlak. Nadat het spinning-current principe is toegepast, is de offset veroorzaakt door mechanische spanning verwijderd, onafhankelijk van de orientatie van het silicium waarin de Hall plaat is gemaakt.

Experimenten Voor de experimenten zijn Hall platen gebruikt die of in een bipolair of in een CMOS proces zijn gefabriceerd. Om de gevolgen van mechanische spanning in verschillende vlakken te bestuderen, zijn CMOS Hall platen gemaakt in (100), (110) en (111) vlakken. De weerstand, gevoeligheid en offset van de gefabriceerde Hall platen is gemeten voor verschillende waarden van de stuurstroom, stuurspanning, substraatspanning en temperatuur.

De gemeten gevoeligheid en weerstand, als functie van de stuurstroom, stuurspanning en substraatspanning, is vergelijkbaar met de waarden berekend met het "effectieve-dikte-model". De metingen aan Hall platen die gerealiseerd zijn in de verschillende kristalvlakken, volgen de resultaten verkregen met het "draaiende-Wheatstone-brug-model".

De afhankelijkheid van de offset van conventionele Hall platen van de bestudeerde parameters, is niet altijd eenduidig. Voor de stuurstroom-, stuurspanning- en substraatspanning-variaties is echter wel een algemene lijn waargenomen. Tussen de CMOS en bipolaire Hall platen zijn geen significante verschillen gesignaleerd. Na het toepassen van het spinning-current principe is de offset in alle gevallen verminderd, onafhankelijk van de variabelen.

Conclusie De offset van geïntegreerde conventionele Hall platen, i.e. de offset voordat het spinning-current principe is toegepast, hangt relatief sterk af van nagenoeg alle bestudeerde parameters. De spinning-current methode vermindert de offset van geïntegreerde Hall platen tot slechts een paar milli-tesla. Deze resterende offset is vrijwel onafhankelijk van het fabricage proces, de stuurstroom of -spanning, de substraatspanning, de temperatuur en het kristalvlak.

MODELLING OF AMORPHOUS SILICON SINGLE- AND MULTI-JUNCTION SOLAR CELLS

J.A. Willemen
16 oktober 1998
Promotors: prof.dr. M. Kleefstra
prof.dr.ir. J.W. Slotboom

Een simulatieprogramma dat is gebaseerd op fysische modellen, is een krachtig hulpmiddel voor het bestuderen van de fundamentele werkingsprincipes van halfgeleidercomponenten. Omdat gehydrogeneerd amorf silicium (a-Si:H) een uiterst complex materiaal is, geldt in het bijzonder voor dit materiaal dat fysisch modelleren tot een beter inzicht in de materiaaleigenschappen en eigenschappen van de componenten kan leiden. Verder kan een complete en goed gekalibreerde simulator worden toegepast voor het optimaliseren van a-Si:H zonnecellen, hetgeen het uiteindelijke doel is van het onderzoek dat in dit proefschrift is beschreven.

Het simulatieprogramma voor a-Si:H zonnecellen, Amorphous Semiconductor Analysis (ASA), is toegepast en verder ontwikkeld. Deze simulator lost de halfgeleidervergelijkingen op in combinatie met fysische modellen voor de materiaaleigenschappen van amorf silicium. Het programma en de modellen zijn in detail beschreven.

Om een simulatieprogramma op een zinnige wijze toe te passen, dient de gebruiker zeer goed bekend te zijn met de fysische principes en de invloed van de modelparameters. Verder is het noodzakelijk dat het model goed gekalibreerd is aan gemeten karakteristieken. Dit proefschrift draagt bij aan het vergroten van het inzicht in de werking van zonnecellen en de kalibratie van het zonnecelmodel.

De resultaten, verkregen met een eenvoudig, benaderend model dat alleen de recombinatie- en generatieprocessen (R-G) beschrijft, tonen aan dat de stroom-spannings (IV) karakteristieken van een a-Si:H pin diode zonder belichting bepaald worden door R-G-processen in de ruimteladingszone van de i-laag. De belangrijkste parameters die van invloed zijn op de R-G-processen, zijn geïdentificeerd. Verder is een aantal analytische relaties afgeleid die de afhankelijkheden tussen belangrijke modelparameters beschrijven. De afleiding is gebaseerd op een theoretische analyse van de halfgeleidervergelijkingen en de recombinatiemodellen. De relaties tonen aan dat het onmogelijk is om onafhankelijke parameterwaarden te bepalen voor, bijvoorbeeld, de mobiliteits-bandafstand, de effectieve dichtheid van vrije toestanden en de beweeglijkheden van de ladingsdragers, als uitsluitend stationaire IV-meetgegevens bij één meettemperatuur beschikbaar zijn. Dit laat zien dat aanvullende temperatuur- en tijdafhankelijke metingen noodzakelijk zijn voor modelkalibratie.

In simulatoren voor a-Si:H halfgeleidercomponenten wordt aangenomen dat de mobiliteit als functie van energie een abrupte sprong vertoont. Een theoretische, analytische beschouwing van deze aanname laat zien dat de exacte energieafhankelijkheid van de mobiliteit niet relevant is voor het elektrisch gedrag van een a-Si:H component, en dat derhalve de aangenomen abrupte sprong geen fouten in de simulaties veroorzaakt.

De modelparameters die de grootste invloed hebben op de simulaties van a-Si:H componenten zijn bepaald met een uitgebreide numerieke studie van de parametergevoeligheden. Twee kalibratie-oefeningen met 'inverse modellering' zijn beschreven; drie gesimuleerde IV-curven van een a-Si:H pin diode zijn tegelijkertijd gefit aan experimentele meetgegevens. De grote verschillen tussen de twee verzamelingen 'gekalibreerde' parameters geven aan dat de gebruikte meetdata niet voldoende informatie bevatten om de gekozen parameters onafhankelijk van elkaar te kalibreren. Hieruit wordt tevens geconcludeerd dat het niet mogelijk is om uit deze studie te bepalen welk model de toestandsverdeling van de bengelende bindingen het meest realistisch beschrijft (een Gaussische verdeling of een verdeling volgens het 'defect-pool' model). Aanvullende metingen zijn nodig om meer modelparameters te kunnen kalibreren, zoals bijvoorbeeld metingen van de capaciteit als functie van spanning, externe quantumefficiëntie-metingen of lichtintensiteit-afhankelijke IV-metingen.

een nieuw simulatiemodel voor a-Si:H tandemzonnecellen is ontwikkeld. Dit model beschrijft de fysica van de tunnel-recombinatie-grenslaag tussen de twee enkelvoudige cellen in een tandem-zonnecel door middel van het 'trap-assisted tunneling'-model en een veldafhankelijke toename van de ladingsdragermobiliteiten. Het model wordt toegepast om de degradatie-eigenschappen van tandem-zonnecellen te bestuderen. Dit onderzoek laat zien dat tandem-zonnecellen minder degraderen dan enkelvoudige cellen, omdat de stabielere voorste cel de sterkere degradatie van de minder stabiele achterste cel maskeert. Dit maskeringseffect is ook de oorzaak van de betere vulfactoren van tandemzonnecellen.

De IV-karakteristieken zonder belichting en met lage belichtingsintensiteiten kunnen nauwkeurig gemeten worden indien de n-laag in het gebied rondom de

achtercontacten is weggeëtst. Het gedeeltelijk verwijderen van de n-laag heft de laterale lekstroom op die het intrinsieke gedrag van de diode maskeert. Doordat deze lekstroom correleert met de weerstand van de n-gedoteerde laag, kan meting van deze stroom informatie verschaffen over de eigenschappen van de n-laag zoals deze in een pin-structuur aanwezig is.

Aangetoond is dat met nauwkeurige, temperatuurafhankelijke IV-metingen en simulaties de mobiliteitsbandafstand van intrinsiek a-Si:H bepaald kan worden. Toepassing van deze methode heeft voor deze materiaal parameter een waarde tussen 1.70 en 1.75 eV opgeleverd, hetgeen aanzienlijk lager is dan de algemeen aanvaarde waarde tussen 1.85 en 1.90 eV.

Tot slot laat een onderzoek naar de optische eigenschappen van verschillende metalen achtercontacten zien dat de reflectie-eigenschappen van zilver niet degraderen na blootstelling aan een uitstookbehandeling bij 150 ^{o}C. In tegenstelling tot het gedrag van zilver, neemt de reflectiviteit van aluminium contacten en tweelaags, zilver-aluminium contacten sterk af door vaste-stof reacties, zoals legering en kristallisatie van het silicium.

GEIGER MODE AVALANCHE PHOTODIODE ARRAYS FOR APATIALLY RESOLVED SINGLE PHOTON COUNTING

W.J. Kindt
22 maart 1999
Promotor: prof.dr.ir.em. S. Middelhoek

Dit proefschrift beschrijft de theorie, het ontwerp, de fabricage en de karakterisatie van 'Geiger mode avalanche fotodiode arrays' voor het plaatsgevoelig tellen van fotonen. De twee belangrijkste aandachtspunten zijn het optimaliseren van de pixels en het voorkomen van overspraak in arrays. De zeven hoofdstukken worden hieronder samengevat.

Hoofdstuk 1 introduceert het onderzoek dat hier wordt beschreven. Het beschrijft het doel van en de motivatie voor dit werk, en introduceert de indeling van dit proefschrift. Na een beschrijving van de 'photon counting' techniek en haar toepassingen wordt de 'Geiger mode avalanche photodiode' (GAPD) behandeld. Een GAPD is een fotodiode die tijdens het gebruik wordt ingesteld boven zijn doorslagspanning. De absorptie van een enkel foton kan nu de doorslagstroom initiëren. Deze stroom kan eenvoudig gedetecteerd worden, waardoor fotonen kunnen worden geteld. Twee grote voordelen van GAPDs zijn een hoge quantum-efficiëntie en een hoge tijdresolutie. Een fotonentellend array dat op deze sensoren is gebaseerd zou dezelfde voordelen hebben. De realisatie van een dergelijke 'Geiger mode avalanche photodiode array' (GAPA) is het doel van dit project. Twee belangrijke stappen moeten worden genomen om dit doel te realiseren. De eerste stap is de fabricage van op zichzelf staande pixels met goede eigenschappen. Dit is een uitdaging, omdat GAPDs gevoelig zijn voor verontreinigingen die 'dark counts' en 'afterpulsing' veroorzaken. De tweede stap is de preventie van optische overspraak in een array. Tot dusver heeft dit effect de realisatie van GAPAs verhinderd. De oorzaak van optische overspraak is dat pixels, tijdens het detecteren van een foton, zelf nieuwe fotonen uitzenden die door naburige pixels gedetecteerd kunnen worden.

Hoofdstuk 2 beschrijft de theorie van GAPDs: de pixels van de array. De theorie van de fysische processen die ten grondslag liggen aan de werking van GAPDs (impact ionisatie en 'avalanche breakdown') wordt geresumeerd. De quantum-efficiëntie van een GAPD wordt gemodelleerd. De vier belangrijkste processen die deze grootheid bepalen zijn: 1) de initiatie van de doorslagstroom, 2) de reflectie en refractie van fotonen aan het oppervlak van de diode, 3) de fotonenabsorptie en 4) de ladingscollectie door diffusie van ladingsdragers die worden gegenereerd in de neutrale gebieden van de fotodiode. De factoren die de tijdresolutie bepalen worden besproken. De fundamentele limiet van de tijdresolutie wordt bepaald door fluctuaties in het doorslaginitiatieproces. De manier waarop de doorslagstroom zich verspreidt over het oppervlak van de junctie beïnvloedt de tijdresolutie ook. Een ander aspect dat voor tijdmetingen van belang is, is dat de optische generatie van ladingsdragers in niet-gedepleteerde gebieden een trage staart in de tijdkarakteristiek veroorzaakt. Om het doorslaginitiatieproces te onderzoeken is een Monte Carlo simulator ontwikkeld. Deze simulator is gebruikt om de doorslaginitiatiekans en de limiet van tijdresolutie te bepalen. Een model van 'dark counts' geeft aan dat deze voornamelijk ontstaan door generatie in de depletielaag. Deze generatie kan worden verlaagd door de GAPD te koelen. Bij lage temperaturen en voor diodes met een lage doorslagspanning is tunnelen de dominante oorzaak van 'dark counts', en heeft (verder) koelen nauwelijks effect. Een nieuw model voor 'afterpulsing' relateert de kans op 'afterpulsing' aan de spanning over de diode en aan de concentratie

en invangdoorsnede van de 'traps'. Door de kans op 'afterpulsing' als functie van de tijd te meten, kan de levensduur van de 'traps' worden bepaald. De activeringsenergie van de 'traps' kan worden bepaald door de levensduur bij verschillende temperaturen te meten.

Hoofdstuk 3 beschrijft de theorie van GAPAs. Verschillende effecten kunnen verantwoordelijk zijn voor de fotonenemissie door de pixels van een GAPA. Een model voor de optische overspraak die deze fotonenemissie veroorzaakt, voorspelt de kans dat overspraak zal optreden. Deze kans is erg groot voor pixels die dicht bij elkaar liggen. De oppervlakte-efficiëntie van een array wordt bepaald door de breedte van de ongevoelige rand van de pixels en door de breedte van de ruimte tussen de pixels. De vulfactor van een GAPA is vrij laag. In de praktijk zal een microlensarray nodig zijn om een hoge vulfactor te behalen.

Hoofdstuk 4 beschrijft het ontwerp en de fabricage van GAPAs. Eerst wordt een aantal algemene ontwerpoverwegingen voor de verschillende onderdelen van de GAPA besproken. De concentratie van verontreinigingen moet in GAPDs zeer laag zijn, omdat anders hoge 'dark count rates' en kansen op 'afterpulsing' resulteren. Verontreinigingen kunnen onschadelijk gemaakt worden door 'gettering' stappen in het fabricage proces toe te passen. Verschillende 'gettering' methoden en methoden om implantatieschade te voorkomen kunnen worden toegepast om de eigenschappen van GAPDs te verbeteren. Het fabricageproces dat is gebruikt om prototypes te maken, wordt in detail beschreven. Tijdens de fabricage worden tussen de pixels van het array groeven geëtst, waarvan de wanden met metaal bedekt worden. Dit voorkomt dat fotonen die door een pixel worden uitgezonden naburige pixels kunnen bereiken. Op deze manier wordt optische overspraak voorkomen.

Hoofdstuk 5 beschrijft de uitleeselektronica voor GAPDs en GAPAs. Verschillende methoden kunnen gebruikt worden om GAPDs aan te sturen en uit te lezen. De 'passive quenching' methode is zeer eenvoudig, maar ook erg traag. Snellere methodes zijn: 'active quenching', 'active recharging' en de combinatie van deze twee. 'Active quenching' verhoogt de kans op 'afterpulsing', tenzij een zeer snel elektronisch circuit wordt gebruikt. Twee mogelijke methoden voor de uitlezing van twee-dimensionale GAPAs worden voorgesteld. Door de pixels te combineren met één MOSFET of twee dioden is uitlezing via kolom- en rijlijnen mogelijk. Een 'active recharge circuit' is ontworpen en geïmplementeerd met zowel discrete elementen als CMOS technologie. De discrete realisatie laat zich eenvoudig wijzigen in een 'active quenching' circuit. De kans op 'afterpulsing' als functie van de tijd kan gemeten worden met een 'continuous time-interval measurement circuit'. Een dergelijk circuit is ontwikkeld. De kans dat optische overspraak tussen twee naburige pixels optreedt, kan worden bepaald door zowel de telfrequentie van deze twee pixels als de frequentie waarmee telpulsen co-incident voorkomen, te meten.

Hoofdstuk 6 geeft de resultaten van metingen aan prototypen van GAPDs en GAPAs. De 'dark count rate' en de kans op 'afterpulsing' hangen sterk af van het fabricageproces dat is gebruikt om de prototypen te maken. Het gebruik van polysiliciumkathodes resulteert in zeer lage 'dark count rates' en lage kansen op 'afterpulsing', doordat defecten door het polysilicium ingevangen worden. Er zijn metingen gedaan aan GAPDs met verschillende doorslagspanningen. De experimentele resultaten worden vergeleken met de modellen uit hoofdstuk twee. Verschillende traps zijn aanwezig in de prototypen. Eén van deze traps heeft een vrij lange levensduur en veroorzaakt bij kamertemperatuur een hoge kans op afterpulsing. De invloed van deze trap vermindert als de GAPDs worden gekoeld. De resultaten van optische-overspraak-metingen tonen een goede overeenkomst met het overspraakmodel dat in hoofdstuk drie wordt behandeld. De groeven reduceren de kans op optische overspraak zeer effectief. De 'active recharge' en 'active quenching' circuits die in hoofdstuk 5 worden beschreven zijn experimenteel getest. De circuits werken naar behoren, maar ze verhogen de kans op 'afterpulsing' significant, omdat ze de diode capacitatief belasten.

Hoofdstuk 7 geeft de conclusies van het onderzoek dat in dit proefschrift wordt beschreven. De twee belangrijkste stappen die moesten worden genomen om GAPAs te realiseren, zijn het fabriceren van pixels (GAPDs) met goede eigenschappen en de preventie van optische overspraak in arrays (GAPAs). De realisatie van pixels met goede eigenschappen is geslaagd. Dit succes is vooral te danken aan het gebruik van polysilicium kathodes. Het polysilicium verwijdert defecten uit de actieve gebieden van de pixels en verlaagt daardoor de kans op 'afterpulsing' en de 'dark count rate'. In prototypen van arrays is optische overspraak voorkomen door tussen de pixels groeven te etsen en de wanden van deze groeven met metaal te bedekken. De

effectiviteit van deze methode om overspraak te voorkomen, is experimenteel aangetoond.

MICROMACHINING TECHNIQUES USING LAYERS GROWN IN AN EPITAXIAL REACTOR

P.T.J. Genissen
22 maart 1999
Promotor: prof.dr.ir.em. S. Middelhoek

Dit proefschrift beschrijft de ontwikkeling van nieuwe micromachining technieken, die gebruik maken van lagen die gegroeid worden in een epitaxiale reactor. Na een algemene inleiding over bestaande micromachining methoden wordt de ontwikkeling van drie nieuwe methoden gepresenteerd. Twee van deze methoden zijn later gebruikt om versnellingssensoren, thermische actuatoren en druksensoren te maken.

In hoofdstuk 1 wordt de lezer geïntroduceerd in de wereld van micromachining. Als sensoren en actuatoren geproduceerd kunnen worden in fabricageprocessen, die nauw verwant zijn aan de fabricageprocessen voor elektronica, zal de prijs/prestatieverhouding dramatisch verbeteren. Dit zou leiden tot een sterke kostendaling en verhoogde betrouwbaarheid van systemen die bestaan uit sensoren, elektronica en actuatoren.

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van reeds bestaande technieken voor de fabricage van microsensoren en actuatoren. De bulk micromachining techniek leidt tot relatief grote en sterke structuren die grote uitgangssignalen produceren. Surface micromachining aan de andere kant leidt tot veel kleinere structuren die kleinere uitgangssignalen produceren. Deze kleine signalen maken het vaak noodzakelijk om uitleeselektronica te integreren op dezelfde chip die ook de micromechanische structuur bevat.

In hoofdstuk 3 worden epi micromachining methoden gepresenteerd. Epi micromachined structuren zijn gevormd in lagen die gegroeid zijn in de epitaxiale reactor. Deze methoden combineren de voordelen van surface-en bulk micromachining: De oppervlakte die ze innemen op een chip is even klein als bij surface micromachined structuren en ze produceren veel grotere uitgangssignalen, doordat ze in een veel dikkere laag gemaakt worden. Hierdoor is het niet langer noodzakelijk om uitleeselektronica te integreren op dezelfde chip. Het hoofdstuk begint met een korte introductie in silicium epitaxie. Vervolgens worden verschillende methoden voor het etsen van offerlagen gepresenteerd. Daarna wordt de ontwikkeling van drie epi micromachining methoden gepresenteerd, namelijk MELO, poreus silicium epi micromachining en epipoly.

Hoofdstuk 4 beschrijft de ontwikkeling van epipoly versnellingssensoren. Nadat de benodigde theorie over versnellingssensoren is gepresenteerd, wordt het ontwerp en verwachte gedrag van twee van deze sensoren beschreven. Vervolgens worden meetresultaten van gerealiseerde versnellingssensoren vergeleken met het verwachte gedrag. De gemeten respons komt goed overeen met het verwachte gedrag.

In hoofdstuk 5 worden twee andere epipoly structuren gepresenteerd. Een sterk vereenvoudigd model voor het gedrag van epipoly thermische actuatoren is ontwikkeld en vergeleken met het gedrag van gefabriceerde actuatoren. Het verwachte gedrag blijkt redelijk overeen te komen met het daadwerkelijke gedrag van de gefabriceerde structuren. Ook zijn epipoly druksensoren geproduceerd. Metingen aan deze sensoren tonen aan dat het mogelijk is om piezoresistieve druksensoren te maken met behulp van epipoly technieken. Deze techniek kan dienen als een goedkoop alternatief voor de productie van druksensoren die anders met behulp van ECE gemaakt worden.

A THERMAL ACCELEROMETER

Mw. U.A. Dauderstädt
4 mei 1999
Promotor: prof.dr.ir.em. S. Middelhoek

Dit proefschrift beschrijft de theorie, het ontwerp, de fabricage en het gedrag van een nieuwe silicium versnellingsopnemer die gebaseerd is op warmtegeleiding. In deze sensor wordt de versnelling omgezet in een verandering van het temperatuurverschil tussen een warmtebron en een seismische massa. Dit temperatuurverschil wordt gemeten met polysilicium-aluminium thermozuilen die het voordeel hebben dat ze een groot uitgangssignaal leveren zonder dat er een elektronische versterking nodig is. Bovendien kunnen ze gemaakt worden met behulp van standaard IC-processen.

In dit proefschrift wordt eerst een kort overzicht van bestaande versnellingsopnemers gegeven. Daarna wordt in drie aparte hoofdstukken de theorie van de thermische versnellingsopnemer beschreven. Eerste wordt aangetoond hoe de versnelling wordt omgezet in een verplaatsing van de seismische massa waarbij verschillende soorten ophangingen van de massa en verschillende bereiken van de verplaatsing worden onderzocht. Er wordt gekeken naar de invloed van kruisgevoeligheid op micromachined structuren en van

squeeze-film damping. Het wordt aangetoond dat de theorie voor gasfilms met een gelijkvormige temperatuurverdeling toegepast kan worden met voldoende nauwkeurigheid ook al is de temperatuur in het geval van de thermische versnellingsopnemer niet overal hetzelfde.

De volgende stap is de conversie van de verplaatsing van de seismische massa in een temperatuurverandering. Er worden de drie verschillende mechanismen van warmteoverdracht bediscussieerd: thermische straling, convectie en warmtegeleiding. Bovendien wordt aangetoond dat het gedrag van de thermische versnellings-opnemer door warmtegeleiding wordt bepaald. Er zijn berekeningen van het statische en dynamische gedrag uitgevoerd die tonen dat met een vermogen van 2 mW een temperatuurverschil van ongeveer 10 K tussen de warmtebron en de massa bereikt kan worden en dat het dynamische gedrag van de sensor door de thermische effecten bepaald wordt.

Het temperatuurverschil tussen de warmtebron en de seismische massa wordt gedetecteerd door polysilicium-aluminium thermokoppels. Deze thermokoppels hebben een Seebeck-coëfficient van 0.2 tot 0.4 mV/K. Met een thermozuil van veertig thermokoppels kan dus een temperatuurverschil van 10 K in een uitgangsspanning van 80 tot 160 mV worden omgezet.

De fabricage van the thermische versnellingsopnemer werd eenvoudig gehouden. De thermokoppels en de warmtebron werden in polysilicium gerealiseerd en op een siliciumnitride brug geplaatst om de laterale warmtestroom en de verticale warmtestroom van de warmtebron naar het substraat klein te houden. De seismische massa werd met een KOH-etsstap gerealiseerd, de ophanging door een RIE-etsstap. Voor de experimenten die tot nu toe gedaan zijn werden de twee chips samen gelijmd. Voor verdere ontwikkeling zullen ze worden gebond.

Uiteindelijk worden in dit proefschrift de resultaten van enkele metingen gepresenteerd. De geteste devices werken tot frequenties van ongeveer 300 Hz en leveren uitgangssignalen van 1.5 tot 14 mV/g. De thermische versnellingsopnemer vertoont geen drift en heeft een lage temperatuurgevoeligheid vergeleken met andere thermische sensoren. Dit werd getest in een temperatuurbereik van -50 tot 1500°C maar omdat er geen pn-juncties zijn zou hij tot temperaturen rond de 3500°C moeten werken. De kenmerken van de thermische versnellingsopnemer worden bediscussieerd ten opzichte van verschillende toepassingen zoals toepassingen in de auto-industrie, zogenaamde *gesture controlled remote controls*, 3D-muizen en medische applicaties. Het wordt aangetoond dat de sensor aan de meest kritische eisen van de auto-industrie voldoet. Bovendien worden er suggesties gedaan hoe hij verder verbeterd kan worden.

Door zijn hoge uitgangssignaal, de relatief kleine temperatuurgevoeligheid en drift en de simpele fabricage, is de thermische versnellingsopnemer een interessant alternatief voor conventionele silicium versnellingsopnemers.

OPTICAL MICROSYSTEMS IN SILICON BASED ON A FABRY-PEROT RESONANCE CAVITY

APPLICATION FOR SPECTRAL ANALYSIS OF VISIBLE LIGHT

J.H.G. Correia
11 mei 1999
Promotor: prof.dr.ir. J.H. Huijsing

Apparatuur voor optische spectraalanalyse vindt reeds wijdverspreid toepassing in wetenschap en industrie. Optische microsystemen, zoals microspectrometers geïntegreerd met micro-elektronica, maken nieuwe toepassingen mogelijk.

Dit proefschrift beschrijft het ontwerp, de fabricage en de karakterisatie van twee verschillende typen microspectrometers (scanning type en array type) in silicium voor gebruik in het zichtbare deel van het spectrum (390-760 nm). Er wordt een volledig geïntegreerd optisch microsysteem gepresenteerd (chip-oppervlak 4.2 mm bij 3.9 mm), gebaseerd op zestien kanalen, geconfigureerd in een matrix, samen met elektronische circuits op de chip (uitleeselektronica voor de fotodetectoren, een licht-frequentie omzetter en een bus interface). Het golflengte-selecterend element dat wordt gebruikt, is een Fabry-Perot resonantieruimte, welke dienst doet als interferometer. De Fabry-Perot interferometer bestaat uit twee gedeeltelijk reflecterende parallelle spiegels met lage verliezen, gescheiden door een ruimte. De optische transmissiekarakteristiek van een dergelijk element wordt gekarakteriseerd door een serie scherpe resonante transmissiepieken telkens als de afstand tussen de spiegels gelijk is aan een veelvoud van de halve golflengte van het invallende licht. Het gefilterde spectrum wordt geprojecteerd op de geïntegreerde fotodiode, alwaar de aanwezigheid en intensiteit van de spectrale componenten wordt gedetecteerd.

Beide microspectrometers zijn vervaardigd met gebruikmaking van conventionele IC fabricagetechnieken. Voor de microspectrometer van het scanning type worden bulk-micromachining technieken toegepast. Na de standaard microelectronica-fabricage (bipolair of CMOS) worden in het geval van de array-type spectrometer de Fabry-Perot etalons aangebracht, middels post-processing. De gebruikt spiegels zijn van metaal, vanwege de hoge mate van reflectie over het gehele zichtbare gebied van het spectrum (vooral zilveren spiegels). Bovendien heeft depositie van een enkele laag de voorkeur boven meerlagige diëlektrische spiegels, doordat optisch gladde en vlakke spiegels worden verkregen. De fabricage van de Fabry–Perot microinterferometer in silicium maakt on-chip integratie van zowel elektronische circuits als fotodetectoren mogelijk.

De gerealiseerde silicium microspectrometers kunnen worden toegepast in het zichtbare gedeelte van hot spectrum, met een redelijke resolutie (25 voor een enkele piek in het zichtbare gedeelte van het spectrum).

MICROSTRUCTURAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF SILICON POINT CONTACTS

J.W. Maes
28 juni 1999
Promotor: prof.dr.ir. S. Radelaar

Dit proefschrift beschrijft de microstructuur en elektrische eigenschappen van silicium puntcontacten. Onderzocht is de invloed van rooster- en andersoortige defecten op het transport van ladingsdragers in deze structuren. Voor puntcontacten is gekozen omdat bij elektrische metingen aan deze structuren, effectief slechts een zeer klein volume materiaal wordt afgetast. Drie series puntcontacten zijn gefabriceerd met onderling sterk verschillende microstructuren. De microstructuur van de gefabriceerde structuren is gekarakteriseerd met behulp van electronenmicroscopie, en de elektrische eigenschappen van de puntcontacten door middel van I-V en ruis metingen. Het combineren van deze gegevens maakt het mogelijk om de processen te identificeren die de *elektrische eigenschappen van de puntcontacten* bepalen en te achterhalen wat de rol van defecten hierin is.

Om puntcontacten te verkrijgen met een monokristallijn constrictie gebied en gelijksoortige elektrodes, is een nieuwe fabricageproces ontwikkeld. In dit proces wordt een klein gat geëtst in een dunne siliciumoxide laag op een silicium substraat, gevolgd door selectieve epitaxiale groei van silicium vanuit dit gat en bovenop deze structuur. De beste resultaten in termen van selectiviteit van de groei worden verkregen met een CVD proces, gebaseerd op een $Si_2H_2Cl_2$-HCl-H_2 gasmengsel. Constrictieafmetingen afnemend tot 46 nm zijn verkregen door toepassing van een combinatie van elektronenbundel lithografie, droog etsen, een op een chloorplasma gebaseerde nabehandeling na de ets en een geoptimaliseerde warmtebehandeling voor selectieve silicium groei. De siliciumstructuren zijn gedoteerd met boor met een concentratie van 4×10^{18} cm^{-3}. Terwijl het constrictiegebied van de eerste generatie puntcontacten samengesteld blijkt te zijn uit polykristallijn silicium en monokristallijn materiaal met een hoge dichtheid aan defecten, blijkt de structuur van de derde generatie puntcontacten geheel monokristallijn te zijn. Het silicium rooster in deze puntcontacten bevat slechts een kleine hoeveelheid tweeling defecten en dislocaties. De hoeveelheid defecten in de tweede generatie puntcontacten is van een tussenliggend niveau.

De weerstand van de eerste generatie puntcontacten wijkt sterk af van die van ideale defectvrije silicium puntcontacten in het regiem van diffuus ladingsdragers transport. Ladingen gevangen in gelokaliseerde toestanden op korrelgrenzen in de polykristallijne gedeeltes van het constrictiegebied verlagen de mobiliteit van ladingsdragers. De weerstandswaardes van de tweede en derde generatie puntcontacten liggen zeer dicht bij die van ideale defectvrije structuren. De aanwezige defecten geven geen waarneembare verlaging van de ladingsdragers-mobiliteit. Hiervoor worden onvoldoende meerderheidsladingdragers ingevangen door de defecten en bovendien worden ingevangen ladingen effectief afgeschermd als gevolg van de relatief hoge concentratie van vrije ladingsdragers in de puntcontacten.

De ruiseigenschappen van de puntcontacten zijn 1/f-achtig en de intensiteit van de ruis neemt sterk $(1/d^3)$ toe met afnemende constrictiediameter. De gekromde vorm van de vermogens-spectra van de ruis is karakteristiek voor ruis die voortkomt uit een klein aantal locale ruisbronnen, die elk ruis met een Lorentz spectrum voortbrengen. De verschillen in ruiseigenschappen van de drie generaties puntcontacten weerspiegelen gedeeltelijk de waargenomen verschillen in microstructuur. De ruis neemt af van de eerste naar de tweede generatie puntcontacten, maar niet van de tweede naar de derde generatie. Zeer waarschijnlijk bepalen ruisbronnen in de oxidedelen aan de rand van de constrictie de ruis van de derde generatie puntcontacten. Dit in plaats van ruisbronnen in het silicium. Berekeningen aan het

karakteristieke stroomprofiel in een diffuus puntcontact laten zien dat het effectief afgetaste volume in ruismetingen een torusachtig vorm heeft, en is gelokaliseerd net binnen de rand van de constrictie. Dit maakt de ruiseigenschappen van de puntcontacten extra gevoelig voor ruisbronnen in het oxide. De sterke diameter afhankelijkheid van de ruis wordt goed verklaard door een model dat het effect van het specifieke stroomprofiel op de ruis eigenschappen in rekening brengt. Als de temperatuur verlaagd wordt tot beneden 200 K, vindt een overgang plaats van 1/f-achtige ruis naar telegraafruis. De specifieke amplitude van de fluctuaties en de spanning en temperatuur afhankelijkheid van de schakeltijden van de fluctuaties suggereren dat deze ruis ontstaat door het spontaan op- en ontladen van locale ladingsdragerstoestanden in het oxide aan de rand van de constrictie.

Beneden 40 K, vindt het ladingsdragers transport in de puntcontacten plaats via een 'variable range hopping' proces. De niet-lineaire vorm van de I-V curves boven een zekere kritische spanning, kan goed verklaard worden door een model voor een elektrisch veld geactiveerde hopping in een bolvormig gebied rond de constrictie van het puntcontact. De exacte vorm van de I-V curves is specifiek voor variable range hopping in een puntcontact structuur. Het lijkt aantrekkelijk om variable range hopping in puntcontacten verder te onderzoeken, omdat mesoscopische effecten verwacht worden bij temperaturen beneden 1 K.

Op zoek naar de electrische vingerafdruk van een individuele dislocatie, is een serie puntcontacten van een alternatief ontwerp gefabriceerd. Een speciale techniek is ontwikkeld om de constrictie te centreren boven op een dislocatie. Daarnaast is de tweede elektrode gemaakt van aluminium. Echter, gecontroleerd meten van een individuele dislocatie bleek niet haalbaar te zijn door intrinsieke beperkingen van de fabricagetechnieken en de ongunstige vorm van het effectief afgetaste volume in de puntcontacten.

De resultaten beschreven in dit proefschrift geven inzicht in de invloed van verschillende soorten defecten op de elektrische eigenschappen van silicium puntcontacten, en kunnen bijdragen aan een beter begrip van de eigenschappen van andere silicium-gebaseerde structuren of onderdelen van actieve schakelelementen. De resultaten geven ook een gedetailleerd inzicht in de uitwerking van verschillende fabricagetechnieken op de microstructuur en elektrische eigenschappen van silicium puntcontacten. Om de rol van afschermingseffecten van door defecten ingevangen ladingen verder te verhelderen, lijkt het nuttig om puntcontacten met een lagere doteringsconcentratie te onderzoeken. Verder is het noodzakelijk om de rol die het invangen van atomaire onzuiverheden door defecten speelt, in hun elektrische activiteit te onderzoeken. Ook lijkt het zinvol om de invloed van het belasten van puntcontacten met hete ladingsdragers, op hun weerstand en ruis te bestuderen.

REDUCED-ORDER MODELING OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC FIELDS

R.F. Remis
5 oktober 1998
Promotors: prof.dr.ir. P.M. v.d. Berg
prof.dr.ir. H. Blok

In dit proefschrift is een methode beschreven waarmee transiënte elektromagnetische velden in complexe configuraties berekend kunnen worden. De vergelijkingen van Maxwell dienen als uitgangspunt. Deze vergelijkingen vormen een hyperbolisch stelsel van gekoppelde eerste orde partiële differentiaalvergelijkingen en zijn in een bepaalde matrix-operator vorm geschreven. Aan de hand van deze vorm is de structuur van de vergelijkingen van Maxwell besproken. Vervolgens zijn deze vergelijkingen ruimtelijk gediscretiseerd. Hiervoor zijn eindige differenties gebruikt, omdat eindige differenties de structuur van de vergelijkingen niet verstoren. De tijdvariabele wordt niet gediscretiseerd. Na de ruimtelijke discretisatie wordt een algebraïsche matrixvergelijking verkregen. De oplossing van deze vergelijking kan geschreven worden in termen van een matrixfunctie die op een bronvector werkt. De tijdcoördinaat komt als een continue variabele in het argument van de matrixfunctie voor.

In veel geofysische toepassingen vinden metingen plaats binnen een tijdsinterval waarin verplaatsingsstromen een verwaarloosbare bijdrage leveren aan het totale elektromagnetische veld. De verwaarlozing van deze bijdrage leidt tot een parabolisch stelsel van gekoppelde eerste orde partiële differentiaalvergelijkingen. Het gedrag van het elektromagnetische diffusieveld wordt door dit stelsel beschreven. Ook het parabolische stelsel is in een matrixoperator vorm geschreven. Vervolgens zijn eindige differenties gebruikt om de ruimtelijke coördinaten te discretiseren. De oplossing van de resulterende algebraïsche matrixvergelijking kan geschreven worden in termen van een matrixfunctie die op een bronvector werkt. De tijdcoördinaat wordt ook hier niet gediscretiseerd.

Met behulp van zogenaamde Lanczos-algoritmen worden de matrixfuncties geëvalueerd zonder de tijdcoördinaat te discretiseren. Deze algoritmen construeren aan de hand van een drie-term relatie vectoren die bekend staan als Lanczos-vectoren. Ook wordt er een tridiagonale matrix gegenereerd. Deze matrix bevat de recurrentiecoëfficiënten die door het algoritme geproduceerd zijn. De orde van deze tridiagonale matrix is veel kleiner dan de orde van de matrices die volgen na discretisatie van de vergelijkingen van Maxwell. De relatie tussen de Lanczos-vectoren en de tridiagonale matrix wordt beschreven door één vergelijking. Aan de hand van deze vergelijking kunnen benaderingen voor de oplossingsvector geconstrueerd worden. Om deze benaderingen te evalueren is het weer noodzakelijk om een matrixfunctie uit te rekenen. Deze keer moet echter een functie van de tridiagonale matrix bepaald worden. Deze functie kan met behulp van standaardtechnieken worden berekend, aangezien de tridiagonale matrix kleine afmetingen heeft. Vanwege deze eigenschap noemen wij de benaderingen modellen van gereduceerde orde (Engels: reduced-order models).

In dit proefschrift worden modellen van gereduceerde orde geconstrueerd voor elektromagnetische golf- en diffusievelden. Tevens zijn er computerprogramma's geschreven waarmee driedimensionale configuraties doorgerekend kunnen worden. Voor een aantal realistische configuraties zijn de resultaten in dit proefschrift terug te vinden. De gegeven toepassingen illustreren het gebruik van de grondradar om de ondiepe ondergrond te karakteriseren. Er zijn echter vele andere toepassingsgebieden. Zo kunnen de programma's ook gebruikt worden om elektromagnetische velden in dieper gelegen geologische formaties te berekenen. Een volledig ander toepassingsgebied is de hyperthermie. Elektromagnetische velden worden hier gebruikt om kankertumoren te verhitten. Met behulp van de computerprogramma's kunnen wij het elektromagnetisch veld in het menselijk lichaam berekenen. De inzichten die deze berekeningen geven kunnen helpen kankerbehandelingen effectiever te maken.

MULTI-FREQUENCY NONLINEAR PROFILE INVERSION METHODS

K.F.I. Haak.
1 februari 1999
Promotor: prof.dr.ir. P.M. v.d. Berg

Het uiteindelijk doel van het inversieprobleem is het bepalen van de fysische parameters, die een voorwerp bepalen en die men niet op een directe wijze met de zintuigen kan waarnemen. Als onderzoekend instrument gebruikt men elektromagnetische, akoestische en elastodynamische golven, die in het betreffende voorwerp binnendringen, allerlei golfverschijnselen, zoals terugkaatsing, buiging, breking en verstrooiing vertonen, uiteindelijk de ruimte weer verlaten en gedeeltelijk opgevangen worden door een daartoe uitgeruste

waarnemer. De taak van de onderzoeker bestaat uit het construeren van een beeld van het onbekende voorwerp op een doeltreffende, rendabele, betrouwbare en rekenkundig aantrekkelijke wijze aan de hand van de opgevangen verstrooide golfpatronen.

Het woord *beeld* geeft aan dat het beeldvormingsproces een succesvolle poging is het visuele waarnemingsstelsel van de mens na te bootsen. In feite interpreteert het menselijk zintuig de waargenomen elektromagnetische golven (licht) en genereert op een wonderlijke wijze het beeld wat ons in staat stelt op afstand waar te nemen. Met technische middelen breidt men dit beeldvormingsproces uit tot andere golflengten waarvoor het menselijk oog ongevoelig is. Men gebruikt deze technieken als voorwerpen ontoegankelijk zijn of als het onpraktisch is, vanwege economische of andersoortige kosten, de plaats op mechanische wijze te bereiken. Toepassingen kunnen worden gevonden op het gebied van radar sonar, remote sensing (op afstand waarnemen door bijvoorbeeld satellieten), materiaalwetenschappen, medische diagnostiek, landmijnendetectie, bepaling van ijsdiktes in polaire gebieden, archeologisch onderzoek, geofysische exploratie en het opsporen van milieuverontreinigingen.

In dit proefschrift worden enkele nieuwe inversiemethodieken ontwikkeld die de metingen van het verstrooide veld interpreteren en het gewenste beeld construeren. In de theoretische beschrijving van het hele inversieproces maakt men onderscheid tussen het *inverse verstrooiingsprobleem* en het *inverse bronprobleem*. In het *inverse verstrooiingsprobleem* heeft men te maken met een fysische toestand, waarbij de bronnen en het verstrooide veld in een begrensd ontvangersgebied bekend zijn, terwijl het veld en de materiaaleigenschappen in de locatie, waarin we geïnteresseerd zijn, onbekend zijn. In het *inverse bronprobleem* is de situatie anders. Het opgewekte veld in het ontvangersgebied is bekend, net zoals de materiaalparameters, maar de belichtende bronnen zijn niet bekend. Het doel van het *inverse bronprobleem* is dan de reconstructie van deze bronnen. Vanuit wiskundig standpunt gezien, is het *inverse verstrooiingsprobleem* identiek aan het *inverse bronprobleem*, wanneer de combinatie van het onbekende voorwerp en het invallende veld als een secundaire bron wordt opgevat.

In alle ontwikkelde inversie-algoritmes wordt het niet-lineaire verstrooiingsprobleem geformuleerd door middel van integraalrepresentaties. Deze representaties beschrijven het verband tussen het veld en de contrastfunctie (die een maat is voor de materiaalparameters) in de desbetreffende ruimte, het invallende golfveld en het verstrooide veld. Daarna wordt het inversieproces als een optimalisatieprobleem behandeld en dit probleem wordt iteratief opgelost. Door de fout in de integraalvergelijkingen te minimaliseren worden de veldgrootheden en de contrastfunctie gereconstrueerd, zonder in elke iteratiestap het veld, dat in een gegeven materiaalconfiguratie voorkomt, uit te rekenen. Het eigene van dit proefschrift is het gebruik van data (verstrooide velden) met verschillende frequentiecomponenten. Het idee is dat materiaaleigenschappen niet alleen invariant zijn ten opzichte van bronlocaties, maar ook ten opzichte van de frequentie van de opgewekte golven. Dit laatste geldt alleen als de materie verliesvrij is, terwijl de frequentieafhankelijkheid van media die dissipatie vertonen bekend is wanneer het Maxwell-model als uitgangspunt worden gekozen. De oplossingsmethoden verschillen onderling in de keuze van de fundamentele onbekenden, de specifieke integraalvergelijkingen en de oplossingsstrategie, die tot constructie van de onbekende grootheden moet leiden.

De geïmplementeerde inversieschema's werden beproefd op numerieke prestaties met betrekking tot de maximum amplitude van contrasten die gereconstrueerd kunnen worden, de nauwkeurigheid van het uiteindelijke resultaat, de rekentijd en de numerieke stabiliteit. De metingen van een canonieke tweedimensionale configuratie zijn op kunstmatige wijze verkregen door middel van numerieke schema's, waarbij maatregelen zijn genomen om de zogenaamde 'inverse crime' te voorkomen. Om de robuustheid van de methodes te onderzoeken, zijn de synthetische metingen verontreinigd met ruis en is het aantal zend- en ontvangststations verminderd.

In de 'Modified-Gradient-in-Field (MGF)'-methode, zoals beschreven in Hoofdstuk 3, zijn het veld en de contrastfunctie in het te onderzoeken gebied de fundamentele onbekenden. Tijdens het iteratief optimaliseren worden deze beide grootheden gelijktijdig gecorrigeerd. De niet-lineariteit van de oplossingsmethode wordt zichtbaar in de berekening van de coëfficiënten, die in elke iteratiestap de grootte in de correctie van beide onbekenden bepaalt. Numerieke experimenten tonen inderdaad aan dat inversie met data, die meervoudige frequentiecomponenten bevat betere reconstructies genereert dan inversie met data, die slechts één frequentiecomponent bevat. De behandeling bij meervoudige frequentiecomponenten kan van alle data tegelijkertijd zijn of van data die achtereenvolgens bewerkt wordt (de 'frequency-hopping'-methode). In het laatste geval worden de data uit het lage frequentiegebied eerst gebruikt om een grove reconstructie te maken, vervol-

gens wordt de reconstructie verfijnd met de data uit het hoge frequentiegebied. Beide benaderingen leiden tot ongeveer dezelfde praktische resultaten. Wanneer het voorwerp dissipatie vertoont, steken er problemen de kop op. Dit hoeft niet aan een tekortkoming van het optimalisatieschema te liggen. De moeilijkheid is dat binnen het Maxwell-model de amplitude van het imaginaire deel van het contrast (die een maat is voor de verliezen) omgekeerd evenredig is met de frequentieparameter. Dus is de amplitude hoog als de frequentie laag is en andersom. Bovendien wordt bij het toenemen van de frequentie ook de indringdiepte van de golven steeds kleiner, wat mogelijk de reconstructie van het voorwerp in de weg staat.

Door ook een term te minimaliseren die een maat is voor de ruimtelijke variatie van het contrast wordt het uiteindelijke resultaat visueel aanzienlijk verbeterd met schone en scherpe randen. Door deze extra term wordt namelijk de oplossingsruimte verkleind. Tegelijkertijd moet hiervoor een waarde bekend zijn van een weegfactor, die aangeeft hoe sterk deze term geminimaliseerd wordt ten opzichte van de fout in de integraalvergelijkingen, en die wellicht een maat is voor de gladheid van het profiel. Deze voorkennis kan slechts verkregen worden uit numerieke experimenten.

In de andere inversiemethoden zijn als fundamentele onbekenden de contrastbron en de contrastfunctie gekozen. De contrastbron kan fysisch opgevat worden als de secondaire bron, die de verstrooide data genereert en is opgebouwd uit het materiaalcontrast en het aanwezige veld in het voorwerp. In de naïeve 'Source-Type-Integral-Equation (STIE)'-methode (zie Hoofdstuk 4) wordt de contrastbron iteratief berekend tot een bepaalde nauwkeurigheid, waarna de contrastfunctie door een analytische minimalisatie bepaald wordt. In de gewijzigde 'STIE'-methode wordt in elke iteratiestap eerst de contrastbron uitgerekend, dan de contrastfunctie en tenslotte wordt consistentie geëist in de constitutieve relatie tussen het golfveld, de contrastbron en de contrastfunctie. Hoewel de numerieke resultaten van de gewijzigde methode aanzienlijk beter zijn dan die van de naïeve methode, kunnen ze, wat de reconstructie van grote contrasten betreft, niet concurreren met de resultaten van de MGF methode. Het voordeel van de 'STIE'-methoden is dat ze numeriek aantrekkelijk zijn vanwege de rekensnelheid. Dit is een gevolg van het opsplitsen van het oorspronkelijke niet-lineaire probleem in een aantal lineaire deelproblemen.

De 'Modified-Gradient-in-Contrast-Source (MGCS)'-methode, die in Hoofdstuk 5 behandeld wordt, reconstrueert de twee fundamentele grootheden, de contrastbron en de contrastfunctie, op dezelfde wijze als in de 'MGF' methode, namelijk tegelijkertijd. Helaas tonen numerieke experimenten aan dat deze aanpak niet tot een nauwkeurige karakterisatie van het gewenste beeld leidt.

In Hoofdstuk 6 wordt de 'Contrast-Source-Inversion (CSI)'-methode behandeld, die een vruchtbare combinatie is van de alternerende 'STIE'-methode en de 'MGCS'-methode waarbij tegelijkertijd consistentie wordt geëist in twee verschillende integraalrelaties. Zo wordt in elke iteratiestap eerst de contrastbron bepaald door minimalisatie van de fout in beide representaties, daarna wordt de contrastfunctie gevonden door minimalisatie van de integraalvergelijking, die het golfgedrag in het gebied, waarin het voorwerp zich bevindt, beschrijft. Op deze wijze kan gemakkelijk voorkennis over het voorwerp in het optimalisatieschema verwerkt worden, bijvoorbeeld positiviteit, wat het uiteindelijke numerieke resultaat ten goede komt. De numerieke prestaties van de 'CSI'-methode zijn superieur vergeleken met die van de 'MGF'-methode, zowel met betrekking tot de kwaliteit van de beelden, de amplitude van de contrasten, de robuustheid ten aanzien van toegevoegde ruis en verminderd aantal bronnen en ontvangers, als met betrekking tot de rekensnelheid en de benodigde computergeheugencapaciteit. De kwaliteit van de reconstructie van materialen, die dissipatie vertonen, blijft ook nu achter bij die van verliesvrije structuren.

Concluderend kan gesteld worden dat de 'CSI'-methode een aantrekkelijke kandidaat is voor een doeltreffende, rendabele, betrouwbare en rekenkundig aantrekkelijke inversie van verstrooide golfpatronen tot een beeld van het te onderzoeken voorwerp. Bovendien blijkt het gebruik van data met verschillende frequentiecomponenten zeer positief bij te dragen, zowel aan de kwaliteit van de uiteindelijke beeldreconstructie als aan de verruimde beperkingen voor de maximale contrastamplitude, die nog bepaald kan worden. Hierbij geven de variant waarbij de data met verschillende frequentiecomponenten tegelijkertijd geïnterpreteerd wordt en de variant waarbij dit achtereenvolgens gebeurt (de 'frequency-hopping'-methode) vergelijkbare resultaten. Aangezien numerieke veldberekeningen bij lage frequenties met minder discretisaties uitgevoerd kunnen worden dan bij hogere frequenties, ligt de conclusie voor de hand dat laatstgenoemde variant de meest rendabele is.

SMART SENSOR SYSTEMS FOR HIGH-TEMPERATURE APPLICATIONS

P.C. de Jong
10 november 1998
Promotor: prof.dr.ir. A.H.M. van Roermund

Dit proefschrift beschrijft de ontwerpmethodologie van instrumentatiesystemen voor toepassingen met sensoren bij temperaturen tot 250 à 300 ^{o}C. Naast de elektronische aspecten wordt ook aandacht besteed aan de verpakkingstechnologie. De toepassingen die worden beschreven hebben betrekking op drukmetingen in kilometersdiepe boorputten waar onderhoud en reparatie onmogelijk zijn. Een uitstekende betrouwbaarheid en een goede lange-termijnstabiliteit vormen daarom de belangrijkste eigenschappen van zulke systemen.

In Hoofdstuk 1 wordt een overzicht van de ontwikkelingen in de hoge-temperatuur elektronica gegeven. De drie daaropvolgende hoofdstukken fungeren als een leidraad voor het ontwerpen van elektronische systemen voor hoge temperaturen. Hierin worden de fundamentele en praktische beperkingen besproken van respectievelijk de verpakkingstechnologie, de halfgeleidertechnologie en de elektronische basiscomponenten, d.w.z. de transistoren.

In Hoofdstuk 2 wordt aandacht besteed aan de betrouwbaarheid van de elektronica en de bijbehorende verpakkingen.

De belangrijkste factoren die de levensduur van elektronica bij hoge temperaturen beperken zijn niet de componenten, maar de metallisatie en de contacten. Mechanisch en chemisch gezien blijken IC's geschikt te zijn tot ± 400 ^{o}C mits maatregelen worden getroffen om corrosie, elektromigratie en diffusie van metalen tegen te gaan. Ook moet de IC-technologie in staat zijn om de verschillende thermische uitzettingen van de aanwezige materialen op te vangen.

Lijmen, epoxies, plastics en andere synthetische materialen zijn ongeschikt voor toepassingen hij hoge temperaturen omdat ze schadelijke gassen produceren die de betrouwbaarheid sterk verminderen. Bovendien ontstaat er een mix van materialen met verschillende thermische uitzettingscoëfficiënten. Hierdoor ontstaan mechanische spanningen die kunnen leiden tot breuken. Deze problemen zijn opgelost door gebruik te maken van elastische soldeerverbindingen en keramische substraten, behuizingen en printed-circuit boards. Voor de interconnecties is het gebruik van edele metalen aanbevolen omdat deze ongevoelig zijn voor corrosie en, chemisch gezien, slecht reageren. Om de betrouwbaarheid verder te vergroten is het raadzaam om de elektronica in te branden ("burn-in") om eventuele kinderziektes te detecteren. Vervolgens dient de elektronica in een vacuümomgeving geplaatst te worden bij een hoge omgevingstemperatuur. Tenslotte moet de behuizing hermetisch worden gesloten in een zuurstofvrije, chemisch inerte omgeving van stikstof of helium.

Deze technieken hebben geresulteerd in componenten die, mechanisch en chemisch gezien, tot 300 ^{o}C betrouwbaar functioneren, hetgeen voor veel toepassingen voldoende marge oplevert om versnelde levensduurtests uit te voeren. Zo hebben deze technieken geresulteerd in demonstrators waarbij betrouwbaarheidstesten van 72 uur bij 300 ^{o}C en 3 weken bij 225 ^{o}C geen enkel probleem bleken.

In Hoofdstuk 3 worden de eigenschappen van silicium bij hoge temperaturen onderzocht. De mobiliteit van de ladingsdragers neemt af als functie van de doteringsniveaus en de temperatuur. Dit heeft als voornaamste gevolg voor het elektronisch ontwerp dat de maximaal haalbare frequentie van de transistoren zal afnemen naarmate de temperatuur stijgt. Ook zullen lekstromen ten gevolge van p–n juncties sterk toenemen. Hierdoor zal de isolatie van de afzonderlijke transistoren steeds slechter worden bij hogere temperaturen.

Dit is bevestigd in Hoofdstuk 4 waar de werking van de MOS-transistor bij hoge temperaturen wordt gemodelleerd. Voor een 1.6μm CMOS-technologie met een drempelspanning van 0.75V blijkt het dat de invloed van lekstromen gering is tot 250 ^{o}C; het gedrag van de MOS-transistor wordt gekarakteriseerd door een afname van de drempelspanning en een afname van de mobiliteit van de ladingsdragers. De instelstromen worden voornamelijk bepaald door de aangelegde stuurspanningen. Boven 250 ^{o}C wordt de invloed van lekstromen snel merkbaar. Hierdoor kan de instelling van elektronische circuits verstoord raken. Lekstromen tussen verschillende transistoren kunnen leiden tot latch-up tenzij preventieve maatregelen worden genomen zoals guard-ringen, en het aanleggen van sperspanningen.

Ook worden trends in de halfgeleidertechnologie besproken. Het steeds kleiner worden van de transistoren en de daarmee samenhangende afname van hun onderlinge afstand resulteert in een vergrote gevoeligheid

voor latch-up. Daarnaast is er de trend van een afnemende drempelspanning van de CMOS-transistoren. Dit resulteert in een afname van de maximale temperatuur van, met name digitale, schakelingen ten gevolge van sub-threshold lekstromen. Alleen circuit technieken waarbij de drempelspanning gemoduleerd wordt bieden hier uitkomst.

In Hoofdstuk 5 wordt een circuittoepassing beschreven van een instrumentatieversterker waarvan de versterkingsfactor nauwelijks verloopt. Omdat er gebruik is gemaakt van een dynamisch terugkoppelnetwerk kan een zeer stabiele versterker gerealiseerd worden terwijl calibratie of trimming overbodig zijn. Eén van de drie ontwerpen die in dit hoofdstuk besproken wordt is een $11\times$-instrumentatieversterker met dynamische terugkoppeling. Deze versterker is geïntegreerd in een 1.6μm CMOS-technologie. De onnauwkeurigheid van de versterkingsfactor is minder dan 25ppm bij temperaturen tot 250 ^{o}C. Het verloop van deze versterker is minder dan 25ppm per jaar. De versterker werkt tot 300 ^{o}C waarbij de onnauwkeurigheid van de versterkingsfactor nog altijd minder is dan 500ppm.

De systeemaspecten van data-acquisitiesystemen in diepe boorputten worden beschreven in Hoofdstuk 6 als een introductie op de laatste twee hoofdstukken. Een belangrijke voorwaarde voor deze systemen is dat ze eenvoudig, robuust en modulair zijn. Er is gebruik gemaakt van een microcontroller om een dergelijk systeem te realiseren. Een hoge nauwkeurigheid en een goede lange-termijn-stabiliteit worden gerealiseerd door een continue autocalibratie uit te voeren.

In Hoofdstuk 7 wordt de uitleeselektronica voor resistieve bruggen beschreven. Voor drukmetingen in diepe boorputten zijn zeer stabiele resistieve bruggen ontwikkeld voor toepassingen tot 300 ^{o}C. Het verschil in dynamisch bereik tussen de uitgangsspanning en de voeding van de brug wordt opgevangen door een voorversterker met dynamische terugkoppeling zoals beschreven is in Hoofdstuk 5. Een lineaire spanningsgestuurde oscillator verzorgt de omzetting naar een periode-gemoduleerd signaal dat met behulp van een microcontroller gedigitaliseerd wordt. Deze microcontroller voert de continue autocalibratie uit zodat de gehele sensor-interface één orde stabieler is dan de sensor zelf De sensor-interface is gerealiseerd in de vorm van een IC.

Tenslotte wordt in Hoofdstuk 8 de uitleeselektronica voor kwartskristallen voor toepassingen tot 250 ^{o}C beschreven. Een IC is gerealiseerd om een referentiekristal, een temperatuurgevoelig kristal en twee drukgevoelige kwartskristallen uit te lezen. Drie laagfrequent verschilfrequenties worden gegenereerd die door een microcontroller verwerkt worden tot drukwaarden welke gecompenseerd zijn voor temperatuurafhankelijkheden.

RELIABILITY EVALUATION OF ELECTRIC TRANSMISSION AND DISTRIBUTION SYSTEMS

J.J. Meeuwsen.
1 december 1998
Promotor: prof.ir. W.L. Kling

Zo nu en dan valt de elektriciteit uit. Op dat moment blijkt hoe afhankelijk de moderne maatschappij is van elektrische energie. Gelukkig kan de elektriciteitsvoorziening vaak snel worden hersteld. Het komt echter ook af en toe voor dat de elektriciteit voor langere tijd uitvalt. Dit gebeurde in het verleden, maar het zal ook in de toekomst plaatsvinden. Een honderd procent betrouwbare elektriciteitsvoorziening bestaat niet.

Een elektriciteitsvoorzieningsysteem bestaat uit drie hoofdbestanddelen, namelijk: het productiesysteem, het transportsysteem en het distributiesysteem. In al deze onderdelen kunnen storingen optreden. Gelukkig is het systeem zodanig ontworpen dat lang niet alle storingen tot onderbrekingen in de elektriciteitslevering leiden. In de geïndustrialiseerde landen is de kans op een onderbreking als gevolg van een storing in het productiesysteem klein. De meeste onderbrekingen van de levering bij de verbruiker worden er veroorzaakt door storingen in de transport- en distributiesystemen. Deze systemen worden in dit proefschrift in beschouwing genomen.

De betrouwbaarheid van de elektriciteitsvoorziening wordt uitgedrukt in kengetallen voor onbetrouwbaarheid. Voorbeelden van zulke kengetallen zijn de verwachting dat een onderbreking in de elektriciteitsvoorziening optreedt, de zogenaamde onderbrekingsverwachting (uitgedrukt in gebeurtenissen per jaar), de gemiddelde onderbrekingsduur (uitgedrukt in uren of minuten per gebeurtenis) en de jaarlijkse uitvalduur (uitgedrukt in uren of minuten per jaar). Het laatste kengetal is het product van de eerste twee kengetallen.

De kwaliteit van de Nederlandse elektriciteitsvoorziening behoort tot de beste ter wereld. De gemiddelde

waarde van de onderbrekingsverwachting bij een Nederlandse verbruiker op het laagspanningsniveau in de periode 1992-1996 was gelijk aan 0,31 gebeurtenissen per jaar (ongeveer één onderbreking in drie jaar). De jaarlijkse uitvalduur op het laagspanningsniveau was in dezelfde periode circa 21 minuten per jaar. Dit betekent een gemiddelde onderbrekingsduur van circa 68 minuten per gebeurtenis bij een verbruiker op het laagspanningsniveau.

Het centrale thema van deze dissertatie is *'de ontwikkeling van nieuwe of verbeterde modellen en technieken met als doel om betrouwbaarheidskengetallen van elektrische transport- en distributienetten te voorspellen, die overeenstemmen met waargenomen kengetallen bij klanten'.*

Deze formulering verdient enige nadere toelichting. Tot op heden zijn er een flink aantal modellen en technieken ontwikkeld met het doel om de betrouwbaarheid te voorspellen van (onderdelen van) elektriciteitsvoorzieningsystemen. Deze modellen zijn echter over het algemeen nog steeds niet in staat om de betrouwbaarheid van transport- en distributiesystemen te voorspellen op een overtuigende wijze, in het bijzonder op een manier waarin de voorspelde kengetallen overeenkomen met werkelijke, waargenomen kengetallen.

De betrouwbaarheid van transport- en distributienetten wordt niet alleen beïnvloed door de betrouwbaarheid van de componenten in het systeem, maar ook door tal van andere aspecten, zoals: de structuur van het netwerk, de redundantie van componenten, de bedrijfsvoering, de wijze van beveiliging, de invloed van periodiek preventief onderhoud, de graad van automatisering in de beschouwde systemen, etc. Dit toont aan dat een flink aantal aspecten moet worden betrokken in de ontwikkeling van de modellen en technieken.

Elektrische transport- en distributiesystemen hebben tal van gemeenschappelijke kenmerken, maar ook een aantal kenmerken die specifiek zijn voor een transport- of distributiesysteem zelf. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van twee computerprogramma's, die in feite de gegevens van componenten omzetten in informatie over de betrouwbaarheid van de elektriciteitsvoorziening aan gebruikers op verschillende plaatsen in een transport- of distributienet. Het computerprogramma *TRANSREL* is geschikt voor transportsystemen. Het computerprogramma *DISTREL* is geschikt voor distributiesystemen.

Deze dissertatie beschrijft de ontwikkelde modellen en technieken die de belangrijkste ingrediënten vormen van beide computerprogramma's. De gevolgde rekenmethode is gebaseerd op de zogenaamde 'state enumeration approach'. Dit houdt in dat een groot aantal verschillende toestanden wordt opgesomd voor een gegeven transport- of distributienet. Elke systeemtoestand bestaat uit een netwerktoestand, een belastingsituatie en een productietoestand. Teneinde vast te stellen of een systeemtoestand 'succes' of 'onderbreking' representeert, wordt eerst de beschikbare productie vergeleken met de belastingvraag en worden geïsoleerde afnamepunten bepaald. Daarna wordt de systeemtoestand geanalyseerd met behulp van een loadflow. Indien een of meerdere beperkingen van het systeem worden overschreden, wordt vastgesteld of het mogelijk is om deze overschrijdingen te elimineren door correctieve maatregelen in het systeem te ondernemen. Dit proces wordt herhaald totdat voldoende systeemtoestanden zijn opgesomd en geanalyseerd. Op deze wijze kunnen kengetallen voor de betrouwbaarheid worden voorspeld.

De geldigheid van de ontwikkelde concepten wordt aan het einde van het proefschrift aangetoond aan de hand van berekeningsresultaten van verschillende studies voor elektrische transport- en distributienetten. De studies wijzen uit dat de betrouwbaarheid van de beschouwde systemen op tamelijk nauwkeurige wijze kan worden voorspeld met behulp van de modellen en technieken zoals die in dit proefschrift beschreven zijn.

DOCUMENT INTERPRETATION APPLIED TO PUBLIC-UTILITY MAPS

J.G.M. Schavemaker
18 juni 1999
Promotor: prof.dr.ir E. Backer

Computer vision is een volwassen onderzoeksgebied geworden. De huidige systemen, voornamelijk model- en kennisgestuurd, laten een toepasbaarheid zien voor een groot aantal deelgebieden, variërend van medische applicaties tot automatische documentverwerking. Als zodanig kan het oplossingen bieden voor complexe problemen die bestaan in een groot aantal bedrijven. Eén van deze problemen is de omzetting van papieren beheerkaarten van leidingnetten van nutsbedrijven naar een digitaal formaat dat geschikt is voor een Geografisch Informatie Systeem (GIS). Het digitaal opslaan biedt veel voordelen, de belangrijkste is het efficiënte beheer van informatie over het netwerk van leidingen. Nutsbedrijven hebben nog steeds een groot aantal kaarten met relevante informatie over hun netwerken die nog niet beschikbaar zijn in een digitaal formaat. De conversietechnieken die de nutsbedrijven gebruiken zijn echter erg arbeidsintensief en daarom erg duur. Een

automatische conversietechniek is dus gewenst.

De belangrijkste wetenschappelijke bijdrage van dit proefschrift betreft de introductie van een kennisgestuurd systeem voor de interpretatie van beheerkaarten. Omdat er een groot aantal verschillende typen kaarten zijn, die ook nog van kwaliteit kunnen verschillen, is een flexibel interpretatiesysteem vereist. Flexibiliteit wordt geboden door een kennisgestuurd systeem te introduceren waarin domeinkennis kan worden aangepast aan het type kaarten dat moet worden geïnterpreteerd. Een kennisgestuurd systeem maakt het eenvoudig om domeinkennis over kaartobjecten en geometrische relaties tussen kaartobjecten te specificeren en een hiërarchie van complexe objecten te vormen. Verder kan er kennis over controle van het systeem en interpretatieconflicten worden gespecificeerd wat tot een grotere betrouwbaarheid van het systeem bijdraagt. Aan de systeemeis van betrouwbaarheid moet worden voldaan om acceptatie van het systeem binnen een organisatie te waarborgen. Naast deze mogelijkheden van specificatie introduceren wij het concept van *gecombineerde* objectdetectoren. Deze detectoren kunnen objecten in het beeld betrouwbaar herkennen door een combinatie van detectietechnieken te gebruiken. Verder introduceren wij de toepassing van *conflictresolutie* binnen het interpretatiesysteem om de nauwkeurigheid van de interpretatie en de betrouwbaarheid van het systeem nog verder te verhogen.

Het grootste deel van alle documenten bestaat uit documenten met zwarte tekst, symbolen en grafieken op een witte papieren achtergrond. Wanneer deze documenten worden gedigitaliseerd met behulp van een scanner dan is de segmentatie van het digitale beeld in beeldpunten van voorgrond (inkt) en achtergrond (papier) een belangrijke bron van informatie voor ieder systeem voor documentinterpretatie. Als zodanig bestaat een deel van onze wetenschappelijke bijdrage uit de ontwikkeling van een segmentatietechniek. De ontwikkelde methode bestaat uit het opscherpen en drempelen van het digitale beeld, gevolgd door correctie van segmentatiefouten.

Het opscherpen van het digitale beeld gebeurt met een filter dat de onscherpte in het beeld als gevolg van het lenssysteem van de scanner onderdrukt. Het filter maakt de drempelkeuze in de volgende stap minder kritisch. Het filter dat wij beschrijven is een uitbreiding van het filter dat door Kramer is geïntroduceerd. Wij laten zien dat het filter van Kramer eigenlijk een element van een klasse van opscherpfilters is. Verder laten wij zien dat concave filters opscherpeigenschappen hebben en kunnen worden beschreven met een partiële differentiaalvergelijking welke het teken van de Laplaciaan van het op te scherpen beeld bevat. Bewijzen van de opscherpkwaliteiten en de afleidingen van de differentiaalvergelijkingen worden gemaakt met behulp van de recent geïntroduceerde Slope transformatie. De parameters van het filter, dat zijn het aantal iteraties en de grootte van het filter, kunnen worden bepaald aan de hand van een schatting van de onscherpte in het beeld. Voor discrete implementaties van het filter laten wij zien dat parabolische filters een efficiënte implementatie hebben en een gelijkmatig rond opscherpgedrag vertonen.

Er bestaan veel globale drempeltechnieken, een keuze voor een geschikte techniek is daarom moeilijk. Een nadeel van al deze technieken is dat zij slechts één drempel gebruiken en deze bepalen aan de hand van de statistiek over het voorkomen van grijswaarden. Een alternatief voor globale drempeltechnieken, drempelen met hysterese, heeft voor praktische toepassingen bewezen beter te presteren dan globaal drempelen. Drempelen met hysterese verschilt van globaal drempelen in het feit dat het twee drempels gebruikt in plaats van een. Verder gebruikt het ook spatële informatie in tegenstelling tot globale drempeltechnieken die alleen statistiek van grijswaarden gebruiken. Tot nu toe ontbrak een automatische procedure voor de selectie van de twee drempels. In dit proefschrift beschrijven wij een nieuwe procedure die automatisch de twee drempels bepaalt en wij laten zien dat deze procedure optimaal is. De procedure wordt beschreven aan de hand van een definitie van drempelen met hysterese in de mathematische morfologie. De procedure gebruikt een foutmaat dat het aantal fout geclassificeerde beeldpunten telt onder de veronderstelling dat het beeld bestaat uit een mengvorm van normaal verdeelde voor- en achtergrondbeeldpunten.

Zelfs wanneer we een perfecte segmentatiemethode hebben, kunnen er segmentatiefouten voorkomen. Dit komt doordat fouten niet alleen ontstaan door een imperfecte segmentatiemethode maar ook door een imperfect document. Het is duidelijk dat het verbeteren van de segmentatiemethode niet voldoende is om fouten veroorzaakt door een imperfect document op te vangen. Voor onze kaartentoepassing is het grootste probleem twee overlappende karakters. Overlappende karakters hebben eveneens twee oorzaken: de karakters overlappen al op de kaart of de segmentatiemethode is fout. Daarom bieden wij twee oplossingen om beide oorzaken op te vangen. Eén oplossing werkt op het digitale grijswaardenbeeld (voorbewerking: preventie), de andere methode werkt op het resultaat van de segmenta-

KOK OF DOCTOR

Interview met dr.ir. Jurgen van Engelen
Gepromoveerd aan de Technische Universiteit Eindhoven i.s.m. Philips Research

Op 6 mei 1999 promoveerde Jurgen van Engelen aan de TU Eindhoven. Hij is geboren op 15 april 1971 in het Noordbrabantse Rijen. Na de middelbare school in Dongen begon hij in 1989 met de studie Elektrotechniek aan de TU Eindhoven. Nadat hij deze in februari 1995 had afgerond begon hij in mei van datzelfde jaar aan zijn promotie onderzoek bij de vakgroep Elektronische Schakelingen waar hij ook afstudeerde. Na zijn promotie begon hij op 1 juli bij zijn huidige werkgever Broadcom. Nu is hij nog gestationeerd in Nederland, maar het is de bedoeling dat hij een nog onbekend aantal jaren naar het Amerikaanse hoofdkantoor in Irvine, Californië gaat.

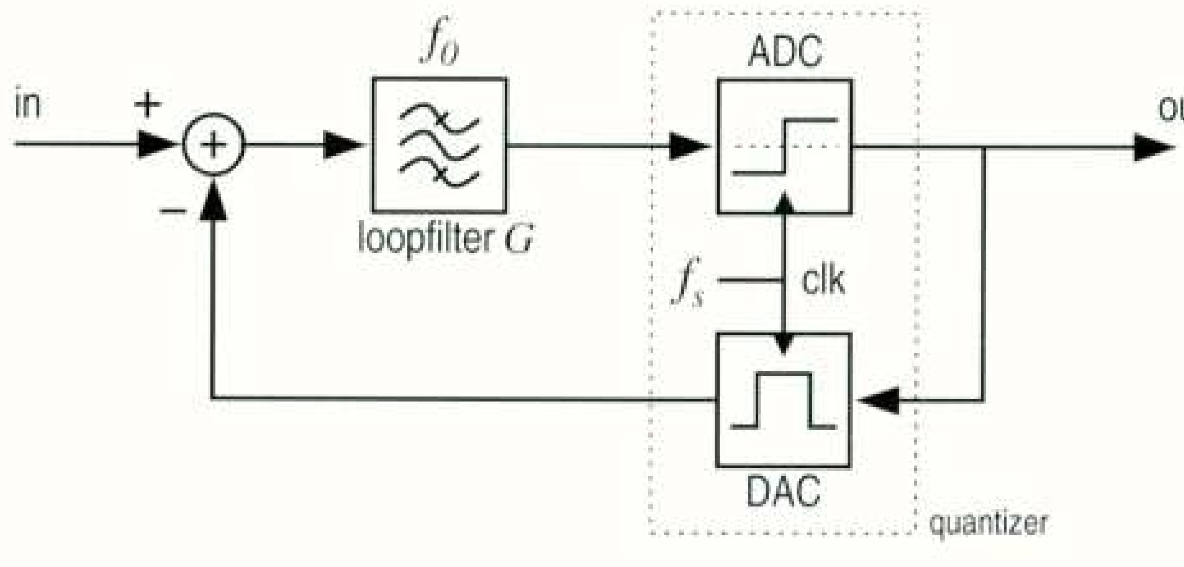
Op de vraag waarom hij elektrotechniek verkoos boven een andere studie luidt zijn antwoord: "Ik ben eigenlijk van jongs af aan geïnteresseerd geweest in techniek. Het spelen met Technisch Lego was dan ook één van m'n geliefde bezigheden op jonge leeftijd. Daarna raakte ik al snel gefascineerd door radio's en tv's. Ondanks wat onprettige ervaringen met de hoge spanningen in een ouderwetse buis radio ging ik al snel door met de experimenteerdozen van Philips. Daarna verschoof mijn interesse meer naar computers, maar mijn besluit stond eigenlijk al vast voordat ik naar het VWO ging: ik zou elektrotechniek gaan studeren!" Achteraf had zijn studie er ook anders uit kunnen zien: "Het klinkt misschien raar, maar als ik om wat voor reden dan ook geen techniek was gaan studeren, was ik waarschijnlijk kok geworden. Ik heb koken van met name toetjes en taarten altijd wel leuk gevonden en dus leek mij kok een prachtig beroep. En daarbij was mijn gedachte: Mensen moeten altijd eten, dus voor een goede kok is er altijd werk!"

Tijdens zijn studie elektrotechniek ging zijn interesse vooral uit naar elektronica en vakken die iets met communicatie systemen te maken hadden. Helaas kwamen deze onderdelen pas later in de studie aan bod. Van Engelen: "Vooral het eerste jaar met daarin veel van de (welliswaar noodzakelijke) wiskunde vond ik daarom nogal lang duren. Verder vond ik ook informatietechnische vakken interessant. Vandaar dat ik een van mijn stages bij de toenmalige vakgroep Informatietechniek heb gedaan. Andere onderdelen zoals energietechniek en regeltechniek vond ik wat minder interessant. Om voor wat afwisseling te zorgen heb ik ook nog vakken zoals ondernemingsrecht en bedrijfseconomie gevolgd."

De beslissing om te gaan promoveren heeft toch wel een paar maanden gekost. Van Engelen: "Toen mijn afstudeerperiode bij de vakgroep Elektronische Schakelingen op zijn einde liep, begon ik na te denken wat ik eigenlijk precies wilde. Na enige tijd besloot ik dat ik nog verder wilde in het ontwerpen van (vooral analoge) circuits. Tijdens een van de stages en mijn afstuderen kwam ik er achter dat vooral het wat dieper uitzoeken van theoretische en praktische problemen mij wel trok. Na een bezoek aan een banenmarkt ging mijn voorkeur uit naar vervolgstudie in de vorm van een tweejarige AIO-opleiding, eigenlijk met name omdat de lange duur van een vierjarig AIO-schap mij nogal afschrikte. Het koste prof. van Bokhoven dan ook behoorlijk wat moeite om mij te overtuigen om toch te gaan promoveren. Een belangrijk punt voor mij persoonlijk daarbij was, dat het promotie onderzoek bij of tenminste in samenwerking met een bedrijf plaatsvond. Uiteindelijk bleek dat Philips te zijn, en het onderwerp bandpass sigma delta modulatoren." Achteraf gezien vond hij de vier jaren snel voorbij gaan en bleek zijn vrees daarvoor ongegrond. Waren er ook aspecten die tegenvielen? "Wat mij tegen is gevallen is toch wel de partijdigheid die je soms tegen komt in de wetenschappelijke wereld. Je merkt soms dat persoonlijke of bedrijfsbelangen in de weg staan van het wetenschappelijk belang, en dat vind ik toch jammer."

Over hoe hij zijn promotiezitting ervaarde vertelt hij het volgende: "Net voor en aan het begin van de promotiezitting had ik toch een beetje last van een gezonde nervositeit. Want hoewel ik vier jaar lang met een bepaald onderwerp ben bezig geweest, weet je misschien niet op alle vragen direct een antwoord. Achteraf viel het mij mee, vooral omdat er een paar vragen bij waren waarin je echt je 'ei' kwijt kunt. Zo was er een vraag over een gedeelte in mijn proefschrift waarin meer een kwalitatieve dan een volstrekt wiskundige uitleg gegeven werd voor een bepaald fenomeen. Zo'n vraag prikkelt en geeft aanleiding tot een leuke discussie. Een andere leuke maar lastige vraag is om je mening te geven over een aangrenzende toepassing of vakgebied waaraan je eigenlijk niet gewerkt hebt."

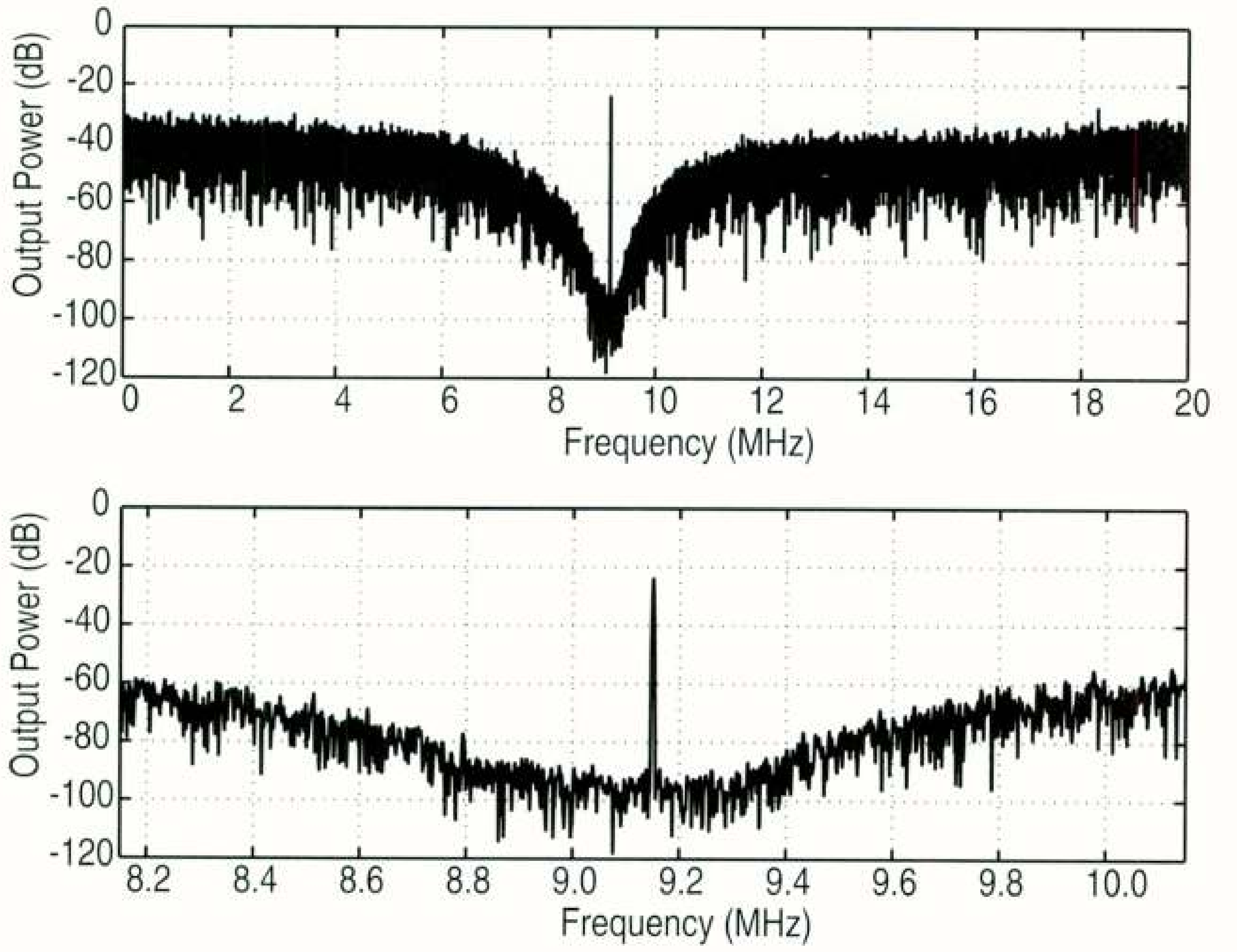
Zijn promotieonderwerp betreft de toepassing van de sigma delta modulatietechniek bij analoog naar digitaal- en digitaal naar analoog-conversie van signalen. Aan de hand van het blokschema (Fig. 1)



Figuur 1: *Blokschema van een bandpass sigma delta modulator.*

legt hij verder uit: Voor analoog naar digitaal conversie is het nodig om een signaal te kwantiseren met een bepaalde resolutie/nauwkeurigheid. Door middel van een terugkoppellus in de sigma delta modulator met daarin een lusfilter worden de fouten die een grove kwantisator maakt in een bepaald (smal) frequentiegebied onderdrukt. Daardoor wordt de nauwkeurigheid/resolutie van de A/D omzetting in deze frequentie band zeer groot. Buiten deze frequentie band zijn de kwantisatiefouten echter wel zeer groot. Het resultaat is dan eigenlijk een A/D omzetter die voor slechts een beperkt frequentiegebied werkt (Fig. 2). Normaal wordt deze frequentieband rond nul gekozen. Bij bandpass SDMs kan deze frequentie band eigenlijk overal tussen 0 en de halve samplefrequentie liggen.

Een bandpass SDM is dan ook geschikt voor systemen waarbij een smalle signaalband op een draaggolf wordt gemoduleerd, en waarbij de draaggolf frequentie veel groter is een de bandbreedte van het signaal. Dit soort signalen komen veel voor in communicatie "systemen" zoals gsm-telefoons, radio's en televisies. De theoretisch haalbare resolutie (hoeveel bits) hangt nu af van de verhouding van de bandbreedte en de samplefrequentie (ook wel oversampling ratio genoemd) en de "frequentie discriminatie" in het filter. Hoe hoger de orde van het lusfilter, des te groter de frequentie discriminatie en de haalbare resolutie. Een probleem is nu dat door de hoge orde van het filter en de zeer niet-lineaire kwantisator in de lus, de sigma delta modulator instabiel kan worden bij een bepaald ingangssignaal. Door de instabiliteit ontstaan er zelfinstandhoudende oscillaties in de modulator waardoor de A/D omzetting niet meer naar behoren functioneert. Waar ik me in mijn onderzoek vooral mee bezig heb gehouden is de vraag hoe het lusfilter de stabiliteit van de modulator beïnvloedt. Met andere woorden: hoe moet je het lusfilter ontwerpen om in ieder geval bij geen ingangssignaal een stabiel systeem te hebben en als het kan ook een zo goed mogelijke performance te halen. Hiervoor heb ik een uitbreiding gemaakt op een bestaand wiskundig model. Daarmee is het mogelijk om voor een grote klasse van sigma delta modulatoren te bepalen aan wat voor voorwaarden het lusfilter zou moeten voldoen.



Figuur 2: *Gemeten spectrum aan de uitgang van de ontwikkelde bandpass sigma delta modulator.*

Omdat het model een benadering is van de werkelijkheid kan dit maar met een beperkte nauwkeurigheid (een paar procent) en is dit helaas nog niet voor alle lusfilters mogelijk. In veel boeken en artikelen staat uitgebreid beschreven hoe men een sigma delta modulator zou moeten maken, maar de exacte keuze voor het lusfilter (waar de polen en nulpunten zouden moeten liggen) wordt bijna nooit vermeld. Dat geeft een gevoel van geheimzinnigheid. Met de methode die in mijn proefschrift staat beschreven is het heel makkelijk uit te rekenen hoe het lusfilter er uit zou moeten zien. Als proef op de som heb ik (met hulp van de mensen bij het Philips Nat.Lab.) een zesde orde bandpass sigma delta modulator ontworpen voor radio toepassingen. Dit was een van de allereerste bandpass sigma delta modulatoren met zo'n hoge lusfilter orde. Mede daardoor behaalde deze modulator een zeer goede performance.

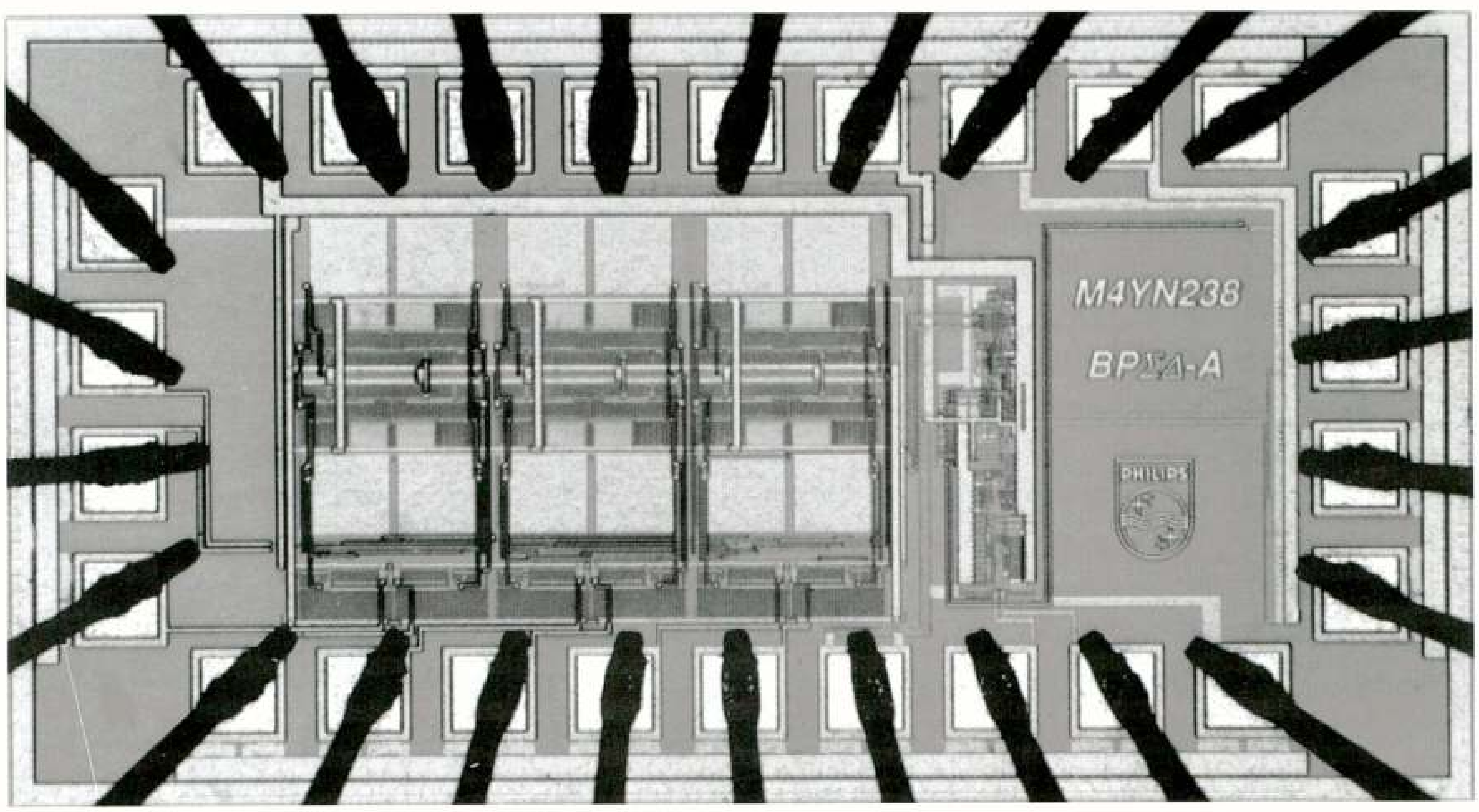
Uw proefschrift wordt uitgegeven door Kluwer, kunt u daar iets over vertellen? Van Engelen: "Bij het bespreken van een eerste versie van mijn proefschrift met de kerncommissie leden maakte enkelen van hen de opmerking dat het misschien wel waard was om er een boek van te maken. Dit komt ook een beetje denk ik omdat mijn boek naast de kern van mijn werk ook een soort globale introductie bevat en meerdere aspecten van sigma delta modulatoren belicht. Ook was het zo dat mijn promotor al wat ervaring had met het publiceren van boeken en dus was het vrij makkelijk om contacten te leggen met Kluwer. Het feit dat bandpass sigma delta modulatoren op het moment een 'hot topic' zijn maakte een publicatie bij Kluwer mogelijk.

Na zijn promotie is van Engelen het bedrijfsleven ingegaan. Zijn huidige werkgever Broadcom, is een relatief klein, maar sterk groeiend bedrijf dat ICs ontwerpt voor computernetwerken (bv. Gigabit Ethernet), kabelmodems, set-top boxen en satteliet ontvangers. Enthousiast vertelt hij hierover: "Je kunt dus wel zeggen dat Broadcom redelijk past met mijn interesses. Het hoofdkantoor zit in Irvine, CA en daar werken ongeveer 500 mensen. Het is de bedoeling dat ik, zodra ik mijn visum heb, daar ook naar toe ga. Op dit moment werk ik nog bij de 'Analog&RF' ontwerpafdeling in Bunnik van Broadcom Netherlands."

Zijn huidige voorkeur gaat uit naar ontwikkeling, maar ook de wetenschappelijke kant trekt hem wel. Van Engelen: "Misschien dat ik in de toekomst wetenschap en ontwikkeling nog eens weet te combineren"

---

1 december 1999
Dion Kant



Figuur 3: *Een foto van het IC van de ontworpen sigma delta A/D converter.*

TELECOMMUNICATIE

BI-DIRECTIONAL ACCESS ON HFC CATV NETWORKS

DESIGN OF A CDMA BASED COMMUNICATIONS SYSTEM

R.P.C. Wolters
23 maart 1999
Promotors: prof.ir. G.D. Khoe
prof.ir. F. van den Dool

Tot recentelijk hadden kabel TV netwerken alleen een distributieve functie. Ze werden geïnstalleerd door lokale overheden om goede TV en radio ontvangst mogelijk te maken in gebieden waar ontvangst met een antenne werd bemoeilijkt. Tegelijkertijd kon een eind worden gemaakt aan de vele, visueel onaantrekkelijke antenne masten op de daken van huizen. Als een reactie op de opkomende liberalisatie van de telecom markt, besloten vele lokale overheden hun netwerken te verkopen aan commerciële kabel TV netwerk exploitanten. Deze exploitanten willen nu geavanceerde diensten zoals Internet en interactieve video diensten gaan aanbieden aan hun klanten. Echter ook exploitanten van telefoon en mobiele netwerken heroverwegen hun activiteiten als reactie op de opportuniteit geboden door de nieuwe markt. Deze exploitanten zullen gebruik gaan maken van geavanceerde xDSL, UMTS, en satelliet technologie. Kabel TV netwerken kunnen echter worden geprefereerd vanwege een aantal redenen. Dit proefontwerp verklaart de architectuur en technologie toegepast in kabel TV netwerken, en het beschrijft een communicatiesysteem dat de realisatie van nieuwe geavanceerde diensten op kabel TV netwerken mogelijk maakt, met gebruik making van geavanceerde "spread spectrum" technieken.

Voordat nieuwe geavanceerde diensten kunnen worden aangeboden, dient echter eerst het kabel TV netwerk te worden aangepast. In het verleden hadden kabel TV netwerken een pure distributieve functie en waren ze niet geschikt voor de realisatie van interactieve diensten met een toegevoegde waarde. De aanpassing van het netwerk vereist de installatie van glasvezel in de ruggegraat van het netwerk, en de installatie van nieuwe tweeweg versterkers in het coaxiale deel van het netwerk. In reeds aangepaste netwerken is vaak een PON-achtige architectuur toegepast in de distributieve richting. Deze architectuur vereist dat speciale technieken worden toegepast om de verschillende optische knooppunten te kunnen onderscheiden. Daarnaast worden in alle netwerken de retour kanalen gestoord door ingress ruis en straling van kortegolf radiozenders. Daarnaast zijn er nog de amplitude en fase overdracht die niet optimaal zijn. Al deze eigenschappen dienen in overweging te worden genomen bij de keuzen van modulatie en "multiple access" techniek. Zoals wordt geconcludeerd in dit proefontwerp, is "Direct Sequence Code Division Multiple Access" (DS-CDMA) de meest geschikte techniek.

Het ontwerp voor de distributieve richting is gebaseerd op technologie zoals die is vastgelegd in de standaarden, in het bijzonder de DVB/DAVIC specificaties en de ETSI standaarden. Deze keus is gemaakt omdat deze specificaties een zeer weid acceptatie niveau kennen, en omdat er geen reden is om spread spectrum in de distributie richting te gebruiken, vanwege de goede netwerk kwaliteit. Het ontwerp voor de retour signalen is gebaseerd op DS-CDMA, waarbij 128 zogenaamde "preferentially phased Gold" codes worden toegepast, waarvan er 126 gebruikt worden voor data transport en 2 voor systeem eigen informatie. Omdat het systeem in synchrone mode werkt behalve tijdens de initialisatie, is het distributieve signaal gekozen als tijdsreferentie voor de retour signalen. De verschillen in fase die resulteren van verschillen in looptijd worden gecompenseerd door een initialisatie mechanisme.

De MAC-laag (Medium Access Control) bepaald welk modem wordt toegestaan gebruik te maken van welke spreidingscode en tijdslot. Het is daarom belangrijk dat een modem bandbreedte krijgt toegewezen op het moment dat deze bandbreedte vereist is. Het toewijzen van tijdsloten die niet worden gebruikt resulteert in een verspilling van bandbreedte. Het achterliggende MAC mechanisme dient daarom alle informatie te verzamelen over de bandbreedte behoefte van elk modem. Daarbij dient onderscheid te worden gemaakt tussen modems die actief data versturen en modems die wel met het netwerk zijn verbonden maar niet met een actieve sessie bezig zijn. Voor actieve modems wordt een "piggybacking" techniek gebruikt om bandbreedte informatie van de modem naar het head-end te versturen. De overige modems gebruiken speciale cellen om hun bandbreedte behoeften naar het head-end te ver-

sturen. Gebaseerd op de verzamelde informatie, kan het MAC algoritme voor elke modem bepalen wanneer het data mag versturen. Het modem zelf bepaalt voor welke applicatie de toegewezen bandbreedte zal worden gebruikt.

INTEGRATED LENS ANTENNA FOR SUBMILLIMETRE-WAVE APPLICATIONS

M.J.M. van der Vorst
15 april 1999
Promotors: prof.dr.ir. G. Brussaard
prof. A.R. van de Capelle

Deze dissertatie behandelt het ontwerp van geïntegreerde lensantennes, die gebruikt worden voor submillimetergolffrequenties. Een typische toepassing is het onderzoek aan de ozonlaag met behulp van remote-sensing technieken vanuit een satelliet. Het bestaande elektromagnetische model voor de analyse van geïntegreerde lensantennes, waarbij de velden binnenin de lens worden weergegeven op basis van "Geometrical Optics" (GO) en buiten de lens op basis van "Physical Optics"(PO), is uitgebreid. Twee uitbreidingen van dit model worden gepresenteerd en besproken: meenemen van interne reflecties en het gebruik van een antireflectielaag.

Allereerst wordt de invloed van de eerste-orde interne reflecties op de bundelpatronen en de ingangsimpedantie onderzocht door binnenin de lens gebruik te maken van GO, PO en de Momenten Methode. Deze interne reflecties (typische waarden van 20-30%) kunnen de prestatie van de lensantenne verslechteren en daarom dienen zij te worden meegenomen in de berekening. Resultaten worden gepresenteerd voor een dubbelslotantenne en verschillende diëlektrische constanten van het lensmateriaal. Om het gereflecteerde vermogen te verminderen, wordt er gebruik gemaakt van een antireflectielaag en de modellering van twee verschillende types wordt beschreven. De meestgebruikte antireflectielaag is de kwartgolflengtelaag, maar om de reflectieverliezen nog verder te verminderen wordt er ook een optimale-dikte antireflectielaag geanalyseerd. Voor beide opties worden er resultaten gegeven van de bundelpatronen en voor de kwartgolflengtelaag wordt tevens de invloed op de ingangsimpedantie bekeken.

Vervolgens wordt het uitgebreide elektromagnetische model toegepast voor het ontwerp van een geïntegreerde lensantenne, die moet dienen als straler voor een limbsounder in de submillimetergolffrequentieband. Een van de doelstellingen is om de prestatie van de geoptimaliseerde geïntegreerde lensantenne te vergelijken met de prestatie van een Potter hoornantenne. Metingen van zowel de bundelpatronen (500 GHz) als de ingangsimpedantie (100 GHz) worden gebruikt om het nieuwe model te verifiëren.

Een andere toepassing voor geïntegreerde lensantennes is hoogresolutie imaging. Daarom worden de scanning prestaties van twee multi-beamconcepten, de enkele lens en het vliegenoog, onderzocht. Zowel de scanhoek als de scanverliezen worden bepaald voor verschillende apertuurdiameters. Voor het vliegenoogconcept wordt tevens de modellering van een geïntegreerde lensantenne met een objectlens (in de Fresnel- of Fraunhoferzone) beschreven. De stralingseigenschappen, die afgeleid zijn van een PO/PO model en een asymptotisch GO/PO model, worden vergeleken voor verschillende frequenties.

TOWARDS EFFICIENT DEVELOPMENT OF COMPLETE CAD FRAMEWORKS

W.M.H.M. Rovers
29 september 1998
Promotors: prof.dr.ir. C.J. Koomen
prof.ir. M.P.J. Stevens

In dit proefschrift behandelen we de ontwikkeling van *complete Computer Ondersteund Ontwerp (COO) framewerken*. COO-framewerken beheren de ontwerpprocessen van ontwerpers en stellen hen daardoor in staat om complexe systemen te maken. Deze service wordt verleend door de OntwerpBeheerSysteem (OBS) component van een COO-framewerk. Het OBS van een compleet COO-framewerk verleent drie soorten services, namelijk ontwerpdata-, ontwerpprogramma- en ontwerpmethodologiebeheer. Een OBS is een dynamisch systeem dat regelmatig gewijzigd wordt, bijvoorbeeld door de toevoeging van nieuwe ontwerpprogramma's of methodologieën. De personen die ontwerpbeheersystemen maken en/of wijzigen worden *ontwerpbeheersysteemontwikkelaars* genoemd. Naast het assisteren van ontwerpers moet een compleet COO-framewerk ook de werkzaamheden van deze OBS-ontwikkelaars ondersteunen. In dit proefschrift zal een methode geïntroduceerd worden welke gebruikt kan worden om op een efficiënte manier complete COO-framewerken te ontwikkelen.

Er is gedurende een lange periode veel verwarring geweest over wat ontwerpbeheer nu eigenlijk inhoudt. Het gevolg was dat er nog minder duidelijkheid bestond over de structuur van de bijbehorende COO-framewerken. Ondanks dit zijn er toch een aantal van deze systemen gemaakt. De meeste van deze framewerken verleenden echter maar een gedeelte van de gewenste COO-framewerk functionaliteit, veelal een bepaalde vorm van ontwerpdatabeheer. Sommige van deze systemen zijn later uitgebreid met ontwerpprogramma- en/of ontwerpmethodologiebeheer. Doordat deze systemen echter oorspronkelijk ontworpen waren voor ontwerpdatabeheer, zijn de meeste niet-uniform en moeilijk te gebruiken. Om een compleet COO-framewerk te kunnen ontwerpen is het absoluut noodzakelijk om een goed beeld te hebben van het complete systeem. Dit is de reden waarom we, in dit proefschrift een gedetailleerd COO-framewerkmodel presenteren. Dit model kan niet alleen gebruikt worden om over COO-framewerken te redeneren, maar geeft ook richtlijnen voor de realisatie van zo'n systeem.

De bestaande COO-framewerken verlenen erg weinig ondersteuning aan de ontwerpbeheersysteemontwikkelaars. In dit proefschrift gebruiken we het COO-framewerkmodel om te laten zien hoe dit aspect van framewerkcompleetheid gerealiseerd kan worden. Het model laat zien dat er een analogie bestaat tussen IC-ontwerpers en OBS-ontwikkelaars, namelijk dat beiden te beschouwen zijn als ontwerpers. Het enige verschil tussen beide typen ontwerpers is wat zij ontwerpen, namelijk respectievelijk IC's en ontwerpbeheersystemen. Net zoals IC-ontwerpers, produceren OBS-ontwikkelaars grote hoeveelheden data en gebruiken ze allerlei programma's om hun OBS-beschrijvingen te creëren. De ondersteuning welke door het framewerk verleend wordt aan de OBS-ontwikkelaars zou daarom ook het beheer van hun data, programma's en methodologieën moeten inhouden. Dit kan gerealiseerd worden door de ondersteuningsfaciliteiten welk een framewerk aanbiedt aan de IC-ontwerpers ook beschikbaar te maken voor de OBS-ontwikkelaars.

De meeste bestaande COO-framewerken zijn incompleet in de zin dat ze niet alle drie de ontwerpbeheerservices verlenen. Bovendien zijn deze services vaak niet goed geïntegreerd. De belangrijkste oorzaak hiervan is dat deze systemen geïmplementeerd zijn gebaseerd op een vaak incompleet en informeel idee over wat ontwerpbeheer is en hoe het bijbehorende ontwerpbeheersysteem gemaakt zou moeten worden. Om deze problemen te vermijden maakt het in dit proefschrift gepresenteerde COO-framewerkmodel gebruik van een wiskundige beschrijving van het bijbehorende ontwerpbeheersysteem. Deze beschrijving is gebaseerd op een analogie tussen ontwerpbeheersystemen en digitale systemen. Dit leidt tot een abstract ontwerpbeheersysteemmodel welk een beschrijving geeft van zowel het gedrag van de drie OBS componenten, dus van het ontwerpdata-, het ontwerpprogramma-, en het ontwerpmethodologiebeheersysteem, als van hun interactie. Dit model kan dienen als een richtlijn voor de constructie van complete ontwerpbeheersystemen welke de drie ontwerpbeheerservices op een naadloze manier integreren. De bruikbaarheid van dit model wordt gedemonstreerd door het te gebruiken tijdens de beschrijving van een ontwerpbeheersysteem voor het LOCAM logische-synthese systeem ontwikkeld door Philips.

De ontwikkeltijd van een COO-framewerk wordt bijna geheel gebruikt voor de constructie en het onderhoud van het bijbehorende ontwerpbeheersysteem. De efficiëntie van COO-framewerkontwikkeling kan daarom sterk verbeterd worden door de OBS-ontwikkelaars beter te ondersteunen. De huidige ont-

werpbeheersystemen zijn geprogrammeerd in een universele programmeertaal. Aangezien dergelijke talen geen speciale constructies voor OBS-ontwikkeling bevatten, zal het programmeren van een ontwerpbeheersysteem in een dergelijke taal een tijdrovend karwei zijn. Een ander nadeel is dat het resulterende systeem zowel moeilijk te onderhouden als uit te breiden zal zijn. De ontwikkeltijd van een COO-framewerk kan daarom sterk gereduceerd worden door het bijbehorende OBS te programmeren in een speciaal ontworpen ontwerpbeheersysteembeschrijvingstaal. In een dergelijke taal kan het te ontwikkelen systeem beschreven worden op een hoger niveau van abstractie. Zover we weten zijn er op het moment echter geen geschikte ontwerpbeheersysteembeschrijvingstalen beschikbaar. In dit proefschrift laten we daarom zien hoe een dergelijke taal gedefinieerd kan worden. Gebruik makend van de richtlijnen verkregen uit het COO-framewerkmodel, definiëren we eerst de eisen waaraan de OBS-beschrijvingstaal moet voldoen. Vervolgens worden *interactieve hiërarchische gekleurde Petri-netten* geïntroduceerd. Daarna laten we zien dat talen gebaseerd op deze uitbreiding van het hiërarchische gekleurde Petri-net concept voldoen aan de gestelde eisen. De bruikbaarheid van een dergelijke taal wordt gedemonstreerd door te laten zien hoe deze gebruikt kan worden om executeerbare ontwerpbeheersysteembeschrijvingen te creëren.

EXPLOITING INSTRUCTION-LEVEL PARALLELISM

A CONSTRUCTIVE APPROACH

L.C. Villar dos Santos
23 november 1998
Promotors: prof.Dr.-Ing. J.A.G. Jess
prof.dr.ir. J.L. van Meerbergen

De toenemende complexiteit van de hedendaagse chips creëert een behoefte om op een hoger niveau van abstractie te ontwerpen. Vanuit een functionele beschrijving van een digitaal systeem, genereert hoogniveau synthese een architectuur die bestaat uit een datapad en een "control unit". Hedendaagse ontwerpproblemen suggereren het gebruik van instructie-niveau parallellisme (ILP), welbekend uit het vakgebied van compilers, voor de *synthese* van digitale systemen. In dit proefschrift wordt het gebruik van ILP technieken als "code motion", speculatieve executie en "loop pipelining" gericht op digitale systemen onder tijdsbeperkingen. Een optimaliseringsprobleem wordt geformuleerd waarin het aantal en soort bouwblokken wordt beperkt. Het doel is, om vanuit de beschrijving en het aantal bouwblokken, een symbolische FSM te genereren voor de "control unit" met minimaal kritiek executiepad. Een methode wordt gepresenteerd waarbij verschillende oplossingen gecreëerd en onderzocht worden met behulp van een lokale zoekmethode.

Om een FSM op te bouwen, gebruikt de methode graaf algoritmen en Boolse technieken. De controlestroom wordt gerepresenteerd als een graaf die bestaat uit "branch" en "merge" knooppunten en zogenaamde "basic blocks". Tijdens het doorlopen van deze graaf, kunnen de operaties die geselecteerd zijn voor een toestand komen vanuit verschillende "basic blocks" en van verschillende loop iteraties. Gelijke toestanden worden geïdentificeerd en samengevat tijdens het opbouwen van de FSM. Door het gebrek aan evenwicht tussen het *potentieel* parallellisme en het echt *bruikbaar* parallellisme binnen de beschikbaar bouwblokken, wordt een techniek genaamd "code-motion pruning" (CMP) voorgesteld om inefficiënte "code motions" te voorkomen.

Resultaten uit experimenten tonen aan dat de toename van het aantal toestanden, door het gebruik van ILP technieken, kan worden beperkt door het samenvatten van gelijke toestanden. Andere resultaten tonen aan dat het percentage oplossingen van goede kwaliteit in de zoekruimte toeneemt door de CMP techniek. Dit baant de weg voor een reductie van de gemiddelde zoektijd.

REAL-TIME CONSTRAINED RECONFIGURABLE COMMUNICATION BETWEEN EMBEDDED PROCESSORS

J.A.J. Leijten
30 november 1998
Promotors: prof.Dr.-Ing. J.A.G. Jess
prof.dr.ir. J.L. van Meerbergen

In dit proefschrift behandelen we het probleem van het ontwerpen van complexe geïntegreerde elektronische systemen. Een dergelijk systeem wordt dikwijls aangeduid met de term 'system-on-a-chip'. Het op een abstracte en, waar mogelijk, op een geautomatiseerde wijze ontwerpen van een dergelijk systeem wordt systeemniveau-ontwerpen genoemd. Deze vorm van ontwerpen verschilt sterk van bekende ontwerpmethoden als hoogniveau-synthese, logische synthese en layout-synthese. Voor deze methoden die gebruikt

worden op een hiërarchisch gezien lager niveau in het ontwerptraject bestaan goed gedefinieerde wiskundige modellen en veelal universele oplossingsmethoden. Het probleem van systeemniveau ontwerpen, daarentegen, is veel minder goed gedefinieerd en daardoor vrij ondoorzichtig. Als een eerste stap op weg naar een degelijke systeemniveau ontwerp methode wordt in dit proefschrift een industrieel relevant ontwerp probleem bestudeerd. Dit betreft het ontwerp van een architectuurplatform voor signaalbewerkingsapplicaties met een hoge doorvoer van data.

In dit proefschrift wordt het systeemniveau-ontwerptraject bezien als een toepassingsgericht proces dat uit twee fasen bestaat. In de eerste fase, worden de eigenschappen en voorwaarden van een goed gedefinieerd toepassingsgebied gebruikt om de juiste concepten voor een architectuurplatform te bepalen. In de tweede fase wordt een specifieke applicatie afgebeeld op een platforminstantie, welke is afgestemd op die applicatie.

Allereerst hebben we de eigenschappen en eisen van het beoogde toepassingsgebied in kaart gebracht. Van nature bezitten de meeste applicaties in het toepassingsgebied veel parallellisme op het niveau van verschillende grofkorrelige functies, zoals ruisreductie of beeldschaling, opererend op de data. De vereiste rekenkracht en communicatiebandbreedte voor een dergelijk netwerk van functies is zeer groot. Typisch liggen deze in de orde van, respectievelijk, 10 miljard operaties per seconde en 10 miljard bits per seconde. Tevens zijn voor het toepassingsgebied verschillende vormen van programmeerbaarheid gewenst. Allereerst betreft dit programmeerbaarheid welke betrekking heeft op individuele functies. Daarnaast is herconfigureerbaarheid, ofwel programmeerbaarheid welke betrekking heeft op de interactie tussen functies, van groot belang. Naast de mogelijkheid tot het uitvoeren van verschillende applicaties op dezelfde hardware moeten programmeerbaarheid en herconfigureerbaarheid het mogelijk maken om de kwaliteit van rekenresultaten uit te wisselen tegen de benodigde hoeveelheid rekenkracht.

Het toepassingsgebied staat verschillende typen data stromen toe. Veel van deze stromen bezitten stringente tijdsbeperkingen waaraan onder alle voorwaarden voldaan moet worden. Voor andere stromen gelden minder zware eisen. Hierbij volstaat het om gemiddeld genomen aan bepaalde tijdsvoorwaarden te voldoen. Verschillende stromen kunnen afkomstig zijn van verscheidene niet-gesynchroniseerde bronnen. Verder kunnen stromen data-afhankelijke datahoeveelheden, snelheden en verwerkingstijden met zich mee brengen.

Om het probleem aangaande de ontwikkeling van een geschikt architectuurplatform aan te pakken, is een goed gedefinieerd specificatiemodel afgeleid. Dit model is gebaseerd op bestaande dataflow-modellen. Een applicatie wordt gemodelleerd door een dataflow-graaf. Verschillende instellingen van de applicatie met betrekking tot de interactie tussen functies worden beschouwd als afgeleide grafen van deze dataflow-graaf. Deze afgeleide grafen worden verkregen door controle tokens welke corresponderen met de gewenste instelling aan te bieden aan speciale controle knopen in de dataflow-graaf. Na verwijdering van redundante knopen en takken bevatten de afgeleide grafen enkel nog rekenknopen. Deze grafen worden taakgrafen genoemd. Geleidelijke overgangen tussen verschillende instellingen corresponderen met overgangen tussen taakgrafen. Deze kunnen uitgedrukt worden in de oorspronkelijke dataflow-graaf door middel van het aanpassen van de controle tokens.

Om grote rekenkracht te verkrijgen worden verschillende functies parallel uitgevoerd. Met andere woorden, er wordt gebruik gemaakt van het van oorsprong in de applicatie voorhanden zijnde parallellisme. Dit heeft geleid tot de definitie van een heterogene multiprocessorarchitectuur waarin meerdere processoren vrijwel autonoom functies parallel kunnen uitvoeren. De volledige multiprocessorarchitectuur kan grofweg worden ingedeeld in drie gedeelten, te weten, het besturingssubsysteem, het signaalbewerkingssubsysteem, en het subsysteem dat betrekking heeft op het gebruik van het achtergrondgeheugen.

In dit proefschrift richten we ons hoofdzakelijk op het ontwerp van het signaalbewerkingssubsysteem. Het belangrijkste probleem in dit subsysteem is het ontwerp van een niet-blokkerend communicatienetwerk voor hoge doorvoer dat meerdere autonome applicatie-domein-specifieke processoren met elkaar verbindt. Dit netwerk moet een gegarandeerde bandbreedte leveren aan datastromen met stringente tijdsbeperkingen. Om dit te bereiken zijn in het netwerk concepten toegepast die analoog zijn aan de methoden die ook gebruikt worden in de digitale schakeltechniek, bijvoorbeeld in telefonie-netwerken. In het bijzonder is de analogie met de zogenaamde 'time-space-time' (TST) netwerken besproken. Om te komen tot een kosten-efficiënte oplossing kunnen fysieke communicatiekanalen in een dergelijk netwerk gedeeld worden door verschillende stromen. Om dit te bereiken wordt de tijd opgedeeld in periodieke transportcycli bestaande uit een vast aantal tijdsloten. In ieder tijdslot kan een fysiek communicatiekanaal de data van een enkele stroom transporte-

ren. In tegenstelling tot wat gebruikelijk is in reguliere TST-netwerken mag in het gepresenteerde communicatienetwerk dezelfde stroom meerdere tijdsloten bezetten, zodat efficiënt kan worden omgegaan met verschillen in de behoefte aan communicatiebandbreedte per stroom. We hebben bewezen dat het communicatienetwerk geconstrueerd kan worden met gebruikmaking van een minimum aantal tijdsloten per transportcyclus. Dit wordt bereikt door toe te staan dat alle verbindingen in het netwerk opnieuw geconfigureerd worden, wanneer een nieuwe verbinding wordt toegevoegd. We hebben een methode afgeleid om tijdens de programmacompilatie voor het processornetwerk een tijdslottoewijzing te doen voor stromen met strikte tijdsbeperkingen. Deze toewijzinging van tijdsloten is gebaseerd op een kleuringsalgoritme voor bipartiete grafen dat oplosbaar is in polynomiale tijd. De uiteindelijke activering van de communicatiekanalen wordt bepaald tijdens het uitvoeren van de applicatie op de hardware. Door de stromen op te delen in gemerkte pakketten, is een speciale communicatie-arbiter in staat om op het juiste moment de juiste verbindingen in het netwerk te genereren. Dit concept maakt het mogelijk om geleidelijk om te schakelen tussen verschillende taakgrafen uit de applicatie, zonder waarneembare afwijkingen te veroorzaken in het uiteindelijke rekenresultaat. Om de efficiëntie met betrekking tot het gebruik van de beschikbare rekenkracht en communicatiecapaciteit te verbeteren, kunnen tijdsloten welke ongebruikt blijven alsnog tijdens de uitvoering van een applicatie toegewezen worden aan stromen welke minder strikte tijdsbeperkingen hebben.

Het laden, starten en stoppen van taakgrafen, alsmede het omschakelen tussen taakgrafen is kort besproken. Deze controletaken worden geregeld door het besturingssubsysteem. Bezien vanuit de optiek van de programmeur van dit subsysteem, is het aanspreken van het processornetwerk identiek aan het aanspreken van een reguliere coprocessor in een traditionele programmeerbare microprocessorarchitectuur.

Met betrekking tot de toegang tot het achtergrondgeheugen is beschreven hoe efficiënt gebruik gemaakt kan worden van de beperkte bandbreedte die geboden wordt door het achtergrondgeheugen. We hebben een bus-arbitrage-mechanisme uit de literatuur besproken dat rechtstreeks toegepast kan worden als geheugenarbitrage-protocol. Dit protocol biedt een lage wachttijd aan controle-gedomineerd dataverkeer naast een gegarandeerde doorvoer voor continu stroomgebaseerd dataverkeer.

Om de kosten-efficiëntie van de heterogene multiprocessorarchitectuur vast te stellen hebben we de belangrijkste karakteristieken die van invloed zijn op de kosten en de prestaties geanalyseerd. Deze analyse is ondersteund door een realistisch implementatievoorbeeld. De resultaten van deze analyse onderschrijven dat het architectuurplatform zeer geschikt is om kostenefficiënte oplossingen voor veeleisende signaalbewerkingsapplicaties te verkrijgen.

Het probleem van systeemniveau-ontwerpen is moeilijk aan te pakken wanneer het doel is een generiek toepasbare oplossing te verkrijgen, zoals gebruikelijk is voor de ontwerpmethoden op lagere hiërarchische niveaus. Succesvolle systeemniveau-ontwerpmethoden zullen hoogstwaarschijnlijk uitgaan van een applicatiedomein-specifieke aanpak. Echter, de belangrijke ontwerpaspecten die in dit proefschrift aan de orde komen zijn toepasbaar op vele zeer verschillende applicatiedomeinen en corresponderende systeemimplementaties. Het gepresenteerde werk vormt daarmee een eerste aanzet tot de ontwikkeling van succesvolle methoden voor het ontwerpen op systeemniveau.

ENHANCED COMPUTER PERFORMANCE THROUGH ADAPTIVE MAIN MEMORY

J. van Lunteren
7 december 1999
Promotors: prof.ir. M.P.J. Stevens
prof.Dr.-Ing. J.A.G. Jess

De rekenkracht van computers is gedurende de laatste tien jaar enorm toegenomen. Dit is met name te danken aan de enorme snelheidswinsten die zijn behaald in microprocessortechnologie. Deze bedroegen gemiddeld 55% per jaar. Daarentegen is het dynamisch *random access* geheugen (*DRAM*), dat de bouwsteen vormt voor het systeemgeheugen van bijna elk computersysteem, vrijwel niet sneller geworden. De resulterende snelheidskloof, die exponentieel groeit, dreigt binnenkort de huidige opmars in rekenkracht te stuiten.

Tot nu toe is het niet gelukt om een geheugentechnologie te ontwikkelen die sneller is dan *DRAM* tegen vergelijkbare kosten. In plaats daarvan zijn andere technieken toegepast om het effect van de groeiende snelheidskloof tegen te gaan. Voorbeelden zijn: het plaatsen van kleine snelle cache-geheugens tussen het systeemgeheugen en de microprocessor, de organisatie van het systeemgeheugen in onafhankelijke banken die parallel gebruikt kunnen worden en het toepassen van *DRAM*-circuits met snellere externe interfacefunc-

tionaliteit zoals *extended data out (EDO) DRAMs* en synchrone *DRAMs (SDRAMs)*. Deze technieken vertragen maar kunnen niet voorkomen dat de zeer beperkte snelheidswinsten in *DRAM*-technologie uiteindelijk de opmars in computer-rekenkracht zullen stuiten.

Het is te verwachten dat tengevolge van deze ontwikkelingen, het systeemgeheugen binnen afzienbare tijd de bepalende factor wordt ten aanzien van de snelheid van computers. Vanaf dat moment zal het toepassen van snellere processoren slechts resulteren in kleine snelheidswinsten. Fundamentele verbeteringen zullen dan slechts gerealiseerd kunnen worden door verbeteringen van het systeemgeheugen.

Dit proefontwerp presenteert een revolutionaire manier om de snelheid van het systeemgeheugen te verbeteren. Deze aanpak is geïnspireerd door de volgende twee observaties in conventionele systeemgeheugen-ontwerpen. De eerste observatie is dat ten gevolge van de aard van de technieken die zijn toegepast om de groeiende snelheidskloof tegen te gaan, de rekenkracht van een computer steeds meer afhankelijk aan het worden is van de mate waarin de referentie-patronen van programma's aansluiten bij de architectuur en technologische karakteristieken van het geheugensysteem. Programma's met een hogere lokaliteit in hun geheugenreferenties zullen sneller worden uitgevoerd ten gevolge van een betere werking van de cache. De tweede observatie is dat, ondanks de net genoemde trend, het systeemgeheugen wordt gekarakteriseerd door een dubbele afscherming. Allereerst zijn de onderliggende architectuur en technologieën afgeschermd van de processor en de programma's die worden uitgevoerd. Ten tweede ontvangt het systeemgeheugen slechts individuele *accesses* maar krijgt geen enkele informatie met betrekking tot patronen die kunnen optreden ten gevolge van programma-eigenschappen, processor- en cache-operatie.

Het proefontwerp heeft tot doel om deze afscherming gedeeltelijk op te heffen, door het realiseren van een sterkere koppeling tussen software, cache en systeemgeheugen. Deze koppeling wordt dan gebruikt om de werking van het systeemgeheugen dynamisch aan te passen aan de referentie-eigenschappen van programma's en cache-controllers met als doel de hoogst mogelijke geheugensnelheid te realiseren voor de gegeven systeemgeheugenen *access*-karakteristieken.

Het ontwerp is ondergebracht in het concept van een adaptief systeemgeheugen. Dit concept bestaat uit de specificatie van een regelbare *address mapping*-functie, de definitie van de adaptatie-doelstellingen, een verzameling adaptatie-algoritmen, modellen om geheugen-*access* verkeer te karakteriseren en verschillende implementatieconcepten. Het concept van een adaptief systeemgeheugen kan op verschillende manieren worden geïntegreerd in de huidige computersystemen. De meest eenvoudige manier vereist slechts het herarrangeren van enige logica in een conventionele memory controller chip. De meest geavanceerde toepassing vereist het plaatsen van multiplexer logica in het datapad tussen processors en systeemgeheugen, en modificaties van de virtuele geheugenmanager, welk een onderdeel is van het *operating system*.

Twee key-onderdelen die zijn ontwikkeld binnen het kader van het adaptieve systeemgeheugen-concept en die uniek zijn in hun toepassing binnen het ontwerpproces van het systeemgeheugen, zijn een fractal *interarrival time model* voor geheugenverkeer en een dynamisch regelbare *address mapping* functie die is gebaseerd op een *lookup table*. Het gepresenteerde werk heeft geresulteerd in twee patent-aanvragen *Address Mapping for System Memory* [Lunteren97] en *Address Mapping for Configurable Memory System* [Lunteren98].

De praktische uitvoerbaarheid van het concept is bewezen. Het concept is beproefd met behulp van verschillende traces van geheugen-*access* verkeer van populaire *benchmark* programma's. Simulaties hebben aangetoond dat toegangstijdreducties in het bereik van 25% tot 40% haalbaar zijn voor computers en *workloads* zoals die vandaag en in de nabije toekomst bestaan. Deze toegangstijd-verbeteringen corresponderen met snelheidswinsten tussen 8% en 38% in vergelijking met conventionele systeemgeheugens voor computersystemen met één processor en tussen 18% en 43% voor multiprocessoren. Het is te verwachten dat met het groter worden van de snelheidskloof, de mogelijke snelheidswinsten beduidend zullen toenemen. Snelheidswinsten in de orde van 100% voor algemene *workloads* en zelfs groter voor wetenschappelijk *workloads* zouden al binnen 5 jaar realiteit kunnen worden.

LOGICS FOR DIGITAL CIRCUIT VERIFICATIONS

THEORY, ALGORITHMS, AND APPLICATIONS

G.L.J.M. Janssen
24 februari 1999
Promotors: prof.Dr.-Ing. J.A.G. Jess
prof.dr. J.C.M. Baeten

Dit proefschrift presenteert de resultaten van een onderzoek naar de toepassing van diverse logica's met betrekking tot de verificatie van digitale hardware. De aanpak belicht zowel de eindgebruikeraspecten als ook de aspecten t.a.v. de implementator.

Deze thesis is onderverdeeld in 3 delen: deel I beschouwt verificatieproblemen op het gebied van combinatorische circuits, deel II focusseert op verificatie van sequentiële circuits en deel III presenteert de software pakketten die zijn ontwikkeld en gaat in op de details van hun implementatie. Daarnaast presenteert deel III een aantal voorbeelden die de typische modellering van problemen in termen van de onderzochte logica's duidelijk maken en laat zien hoe deze opgelost worden met de ontwikkelde programma's:

- bdd – een pakket voor manipulatie van boolse functies
- ptl – een *satisfiability checker* voor LTL temporele logica
- mu – een programma voor propositionele μ-calculus
- bsn2veri – een equivalentie checker voor combinatorische circuits
- bsn2mc – een *model checker* voor Fair-CTL

Deze thesis richt zich vooral op technieken voor hardware verificatie. De aanpak is formeel, d.w.z. mathematische theorieën worden behandeld die de basis vormen voor het modelleren van hardware en het redeneren over het gedrag ervan. We concentreren ons op beslisbare theorieën, waarvoor geldt dat er algoritmen bestaan die gebruikt kunnen worden om zekere eigenschappen van het circuit te bewijzen. Centraal staan de applicatie van de theorie en de ontwikkeling van de efficiënte algoritmen.

SUPPORTING THE EVOLTUTION OF SOFTWARE

P.J. Schoenmakers
1 juli 1999
Promotors: prof.Dr.-Ing. J.A.G. Jess
prof.Dr. P. Marwedel

Moderne ontwerp methoden zijn gebaseerd op object-georiënteerde analyse, wat neerkomt op classificatie en specificatie van objecten en hun interactie. Een implementatie in een object-georiënteerde programeertaal behelst het beschrijven van klassen van objecten. Een belangrijk aspect van deze klassen is hun mogelijke geschiktheid voor hergebruik. Immers, wanneer iets wordt hergebruikt hoeft het niet nogmaals ontworpen, geïmplementeerd en getest te worden.

Moderne ontwerpsystemen en programmeertalen bieden diverse mechanismen tot hergebruik zoals *subclassen* en *wrappen*. Echter, hierbij is de keuze tot, hergebruik van een klasse een binaire keuze: ofwel de klasse is geschikt voor hergebruikt te worden, ofwel zij is dat niet en een nieuwe klasse dient ontworpen te worden. Zelfs kleine onvolkomenheden en tekortkomingen leiden aldus tot herontwerp in plaats van het beoogde hergebruik.

Dit proefschrift bespreekt de validiteit van deze observatie en concludeert dat een aanpak van dit probleem op de gebruikelijke manier, geconcentreerd op de ontwikkeling van klassen, niet helpt. Een dergelijke aanpak kan nog steeds slechts hergebruik volgens het revolutiemodel herbergen: iets is goed, of alles moet anders.

Het leeuwendeel van dit proefschrift behelst ontwerp, implementatie, gebruik en evaluatie van de object-georiënteerde programmeertaal TOM. Hergebruik van een klasse is in TOM geen binaire keuze: aan een klasse kan van alles bijgesteld worden om haar geschikt te maken voor een specifieke situatie; hiervoor hoeft zelfs de broncode van de klasse niet beschikbaar te zijn. Op deze manier ondersteunt TOM de evolutie van klassen, die zich aanpassen aan de omgeving van hergebruik: iets is goed, of een klein beetje anders.

A COMPACT MOSFET MODEL FOR DISTORTION ANALYSIS IN ANALOG CIRCUIT DESIGN

R. van Langevelde
16 november 1998
Promotors: prof.dr. F.M. Klaassen
prof.dr. P.H. Woerlee

Dit proefschrift behandelt het modelleren van het elektrische vervormingsgedrag van MOS-transistoren. Met het toenemende belang van analoge toepassingen in CMOS worden de eisen voor het ontwerpen van schakelingen met betrekking tot signaal-ruis verhouding en lineariteit steeds strenger. Harmonische vervorming of distorsie in het bijzonder is een belangrijk aspect van het ontwerpen van analoge schakelingen geworden. Tot op heden werden compacte MOSFET-modellen voor circuitsimulatie-programma's ontwikkeld met als doel tot een nauwkeurige beschrijving van de I-V–, Q-V–karakteristieken en de bijbehorende eerste-orde afgeleides (transconductantie, conductantie en capaciteiten) te komen. Distorsie-analyse vereist echter een precieze beschrijving van de derde-orde afgeleides waardoor hedendaagse compacte MOSFET-modellen niet goed in staat zijn vervormingseffekten te beschrijven. Deze tekortkoming wordt veroorzaakt door een onnauwkeurige modellering van DC- en AC-gedrag. Niettemin concentreert dit proefschrift zich op het modelleren van het MOS DC-gedrag en wordt het modelleren van het AC-gedrag overgelaten aan toekomstig onderzoek.

Verscheidene compacte MOSFET DC-modellen voor analoge circuitsimulatie zijn geïntroduceerd in de loop der jaren, desondanks zijn de verschillen tussen deze modellen klein. Het onvermogen om vervormingsgedrag te beschrijven kan voornamelijk worden toegeschreven aan een onnauwkeurige modellering van tweede-orde effecten, die steeds belangrijker worden met het voortdurend omlaagschalen van transistorafmetingen. Bovendien resulteert de asymmetrische aard van bovenstaande modellen ten opzichte van drain en source in discontinuïteiten in de hogere-orde afgeleides bij $V_{DS} = 0$ V. Aangezien dit in het bijzonder ongewenst is voor distorsie analyse, is er in dit proefschrift speciale aandacht besteed aan de oplossing van dit probleem.

De distorsie-analyse van gate-spanningsgestuurde MOS-transistoren, die met name belangrijk is voor versterker en actieve V-I–omzetter configuraties, vraagt om een nauwkeurige fysische beschrijving van het mobiliteitsdegradatie-effect. In sterke inversie worden zowel de mobiliteit van gaten als van elektronen voornamelijk beperkt door dezelfde verstrooiingsmechanismen, zoals fonon- en oppervlakte-ruwheidverstrooiing. Desalniettemin is het gebruik van verschillende mobiliteitsmodellen voor elektronen en gaten noodzakelijk als gevolg van een verschil in quantum-mechanisch gedrag. Bovendien is het effect van mobiliteitsdegradatie voor p-type MOS-transistoren ook afhankelijk van het toegepaste polysilicium-gate type.

Nieuwe mobiliteitsmodellen voor zowel elektronen als gaten zijn ontwikkeld, die geïmplementeerd kunnen worden in een compact MOSFET-model. Voor lange-kanaal MOS-transistoren geeft het resulterende model een nauwkeurige beschrijving van het, (gate-spanningsgestuurde) vervormingsgedrag in het gehele sterke-inversie gebied. De nauwkeurige resultaten van het bovengenoemde MOS-model blijven ook gelden voor korte-kanaal transistoren door het effect van serieweerstand mee te nemen. Voor LDD source/drainstrukturen is het in rekening brengen van de gate-spanningsafhankelijkheid van serieweerstand onontbeerlijk. Voor de nieuwste CMOS-generatie echter is deze spanningsafhankelijkheid afwezig als gevolg van het gebruik van "harde" source/drain-strukturen.

Een distorsie-analyse van drain-spanningsgestuurde MOS-transistoren, die met name belangrijk is voor passieve V-I–omzetter configuraties, vraagt om een nauwkeurige fysische beschrijving van snelheidsverzadiging in het ohmse gebied en kanaallengte modulatie in het saturatiegebied. Een diepgaande studie laat zien dat het effect van snelheidsverzadiging verschillend is voor elektronen en gaten als gevolg van verschillende verstrooiingsmechanismen. De implementatie van "statische terugkoppeling" en in mindere mate "zelf-opwarming" is bovendien essentieel voor een correcte modellering van de drainstroom en conductantie in saturatie. "Zelf-opwarming" is alleen van belang voor erg korte-kanaal transistoren.

Voor n-type transistoren bij hoge drainspanning wordt de harmonische vervorming gedomineerd door een begin van het lawine effect. In tegenstelling tot de algemene opvatting is ontdekt dat dit zowel de drain- als de sourcestroom beïnvloedt, met name voor kortekanaal transistoren.

Een correcte implementatie van de bovengenoemde tweede-orde effecten in een compact MOSFET model leidt tot nauwkeurige resultaten voor drainstroom, conductantie en drain-spanningsgeïnduceerde harmonische vervorming voor zowel n-type als p-type MOS-

transistoren in het volledige sterke-inversie gebied.

Een compact MOSFET DC-model moet eigenlijk een nauwkeurige beschrijving van het zwakke-, matige- en sterke-inversie gebied geven. Zeker met de voortdurende afname van de voedingsspanning wordt het matige-inversie gebied steeds belangrijker voor het ontwerpen van analoge schakelingen. Een MOSFET model dat alle inversie gebieden beschrijft, dient gebaseerd te zijn op een 'charge sheet model', dat zowel drift- als diffusie-stroom omvat. Dit vereist een exacte beschrijving van de oppervlakte-potentiaal als functie van de gate-spanning. Een nieuwe expliciete relatie tussen oppervlakte-potentiaal en gatespanning is ontwikkeld en geïmplementeerd in het nieuwe MOS-model. Het resulterende model geeft dan ook een nauwkeurige beschrijving van de harmonische vervorming in alle inversie gebieden voor verschillende CMOS-technologieën.

Voor moderne CMOS-technologieën gebruikt het complete DC-model in totaal 17 of 18 parameters voor een individuele n-type, respectievelijk p-type transistor. Een nauwkeurige extractie van de parameters vereist geen distorsie-metingen, maar maakt slechts gebruik van gemeten stroom-spanningskarakteristieken en de bijbehorende numerieke eerste-orde afgeleides. Na toevoeging van enkele schalingsparameters, is de volledige parameterverzameling schaalbaar en omvat in totaal 45 parameters. Als gevolg hiervan geeft het model een nauwkeurige beschrijving van zowel de drainstroom als de hogere-orde afgeleides over een groot bereik van verschillende geometrieën en klemspanningen, zelfs voor zeer korte-kanaal transistoren.

Het in dit proefschrift geïntroduceerde MOSFET-model is geïmplementeerd in de Pstar circuitsimulator, en is getoetst aan verscheidene analoge schakelingen. Het gebruik van het nieuwe model resulteert in een aanzienlijke toename in nauwkeurigheid in vergelijking met MOS Model 9, en zelfs in een geringe afname van simulatietijd. Het nieuwe model geeft bovendien goede resultaten voor RF-toepassingen.

Met het oog op ontwerpen van schakelingen is het interessant om op te merken dat het vervormingsgedrag van n-type en p-type MOS-transistoren ongelijk is. Dit is te wijten aan verschillen in mobiliteitsdegradatie en snelheidsverzadiging. Bovendien zijn n-type transistoren meer onderhevig aan het lawine effect dan p-type transistoren. Dit alles heeft tot gevolg dat voor lage-distorsie toepassingen het aan te raden is om n-type transistoren te gebruiken voor gatespanningsgeïnduceerde toepassingen en p-type transistoren voor drain-spanningsgeïnduceerde toepassingen.

CCD IMAGING

CONCEPTS FOR LOW NOISE AND HIGH BANDWIDTH

P.G.M. Centen
29 maart 1999
Promotors: prof.dr. F.M. Klaassen
prof.dr. T.G.M. Kleinpenning

In dit proefschrift worden de theoretische aspecten van enkele kritische ontwerpparameters van CCD on-chip versterkers en de signaalverwerking besproken, geanalyseerd en met experimenten ondersteund. Daarnaast worden er methoden geïntroduceerd om die parameters experimenteel te bepalen.

Het signaalpad van een CCD imager bestaat uit:

- Een matrix van lichtgevoelige cellen die een deel van de opvallende fotonen omzet in elektron-gat paren. Gewoonlijk worden de elektronen verzameld en worden de gaten via het substraat afgevoerd. De elektronen, die in één lichtgevoelige cel worden gegenereerd, worden opgeslagen als één ladingspakketje.
- Een CCD-kanaal om het ladingspakketje in de richting van het detectieknooppunt en de uitgang te transporteren.
- Een uitgangscircuit, bestaande uit een reset-transistor met een zwevend diffusie gebied, dat tezamen met de eerste trap van de on-chip versterker het detectieknooppunt vormt.
- Het detectieknooppunt converteert het ladingspakketje in een spanningszwaai op de uitgang van de on-chip versterker.
- Dit uitgangssignaal is de input voor de signaalprocessor. De signaalprocessor zal het CCD-signaal filteren en bepaalt het signaal-ruis getal, de resolutie (MTF) en de dynamiek van het signaal.

Op de uitgang van de signaalprocessor is basisband-video beschikbaar.

In **Hoofdstuk 2** wordt de on-chip versterker geanalyseerd. Het belang van de verhouding tussen de totale capaciteit rond het detectieknooppunt en de detectieknooppunt-capaciteit voor de bandbreedte wordt bediscussieerd. De detectieknooppunt-capaciteit bepaalt de gevoeligheid (V/e) en de totale

detectieknooppunt-capaciteit het ruisgedrag. Aangetoond wordt dat de bandbreedte van de eerste trap wordt verlaagd met een factor gelijk aan de verhouding tussen de totale capaciteit en detectieknooppunt-capaciteit. Als resultaat van de ruis analyse wordt de Noise Electron Density als een parameter voor ruisberekeningen en optimalisatie geïntroduceerd. Het staat ruis optimalisatie toe van de on-chip versterker zonder dat daarbij de signaalprocessor betrokken hoeft te zijn. De Noise Electron Density is een spectrale dichtheid. Aangetoond wordt dat het ruisoptimum, dat de afmetingen van de detectie transistor bepaalt, vlak is. De ruisprestatie verslechterd met 0.5 dB als de breedte van de transistor verdubbeld of gehalveerd wordt ten opzichte van de optimale waarde. Ook wordt de geldigheid van het ontwikkelde ruis model aangetoond voor elke on-chip versterker topologie met een capacitief detectieknooppunt. De gate van de stroombron, die de instelstroom door de detectie transistor bepaalt, kan als een testingang gebruikt worden. Een methode wordt ontwikkeld en gebruikt om de verhouding tussen de totale detectieknooppunt-capaciteit en detectieknooppunt-capaciteit te kunnen meten. Samen met de gemeten gevoeligheid kan dan de totale detectieknooppuntcapaciteit bepaald worden. De toepassing van de ontwikkelde meetmethoden samen met het ruis/bandbreedte model heeft geresulteerd in een verbeterde on-chip versterker. Het was mogelijk om de bijdrage van diverse onderdelen van de layout tot de ruis en de bandbreedte te bepalen. Het ontwerp van een lage ruis en hoge bandbreedte on-chip versterker voor HDTV imagers is succesvol voltooid met een verhoging van de bandbreedte van 15 MHz naar 158 MHz en met een ruisvloer die met 8 dB verlaagd is ten opzichte van zijn voorgangers.

In **Hoofdstuk 3** worden de effecten bestudeerd die samenhangen met het gebruik van zowel oppervlakte- als begravenkanaal transistoren in het detectieknooppunt. De bestudeerde effecten zijn de verschillen in 1/f-ruis en thermische ruis, de bandbreedte en de gevoeligheid. De thermische ruisfactor, die voor een ideale MOS transistor 2/3 is, is voor deze transistoren experimenteel bepaald en gemodelleerd. De ruisfactor neemt snel toe bij toename van de stroomdichtheid in het kanaal van de detectie transistor. De waarde van de thermische ruisfactor voor een oppervlakte transistor is ongeveer twee maal zo hoog dan voor een begravenkanaal type. De achteruitgang in ruisprestatie tengevolge van een van 2/3 afwijkende waarde, kan wel 5 dB bedragen afhankelijk van instelstroom, kanaalbreedte en kanaallengte. Aangetoond wordt, dat een optimale dimensionering van de detectie transistor om een lage ruisspanning te bereiken, niet samenvalt met een maximale bandbreedte. Van beide transistor typen is de Hooge-factor, welke een maat is voor de grootte van de 1/f-ruis, bepaald. In dit hoofdstuk wordt aangetoond dat de CCD-procestechnologie zo ver ontwikkeld is dat ook oppervlakte-transistoren gebruikt kunnen worden in het detectieknooppunt zonder een verslechtering van het ruisgedrag. Men gaat er zelfs op vooruit in bandbreedte.

In **Hoofdstuk 4** wordt het optimale filter voor CCD-signalen bepaald met behulp van variatie-rekening. Aan de hand van het optimale filter is een prestatiegetal voor de signaalprocessor van CDD-signalen afgeleid. De kracht van het prestatiegetal is dat er een ondergrens voor afgeleid kan worden. In veel gevallen wordt dit prestatiegetal bepaald door de som van twee verhoudingsgetallen: één is de verhouding tussen de pixel periodetijd en de duur van het reset-referentieniveau en de andere is de verhouding tussen de pixel periodetijd en de duur van het video in één pixel. Verder worden er enkele voorbeelden gegeven van het gebruik van dit prestatiegetal. Aangetoond wordt dat het ruisgedrag van een imaging keten wordt beschreven door het produkt van de ruis van de on-chip versterker en het prestatie getal van de signaalprocessor en de klokfrequentie. Ook wordt aangetoond dat voor klokfrequenties hoger dan 10 keer de 1/f-kantelfrequentie van de on-chip versterker, het ruisgedrag van de signaalprocessor voorspeld kan worden door een vlak ruisspectrum te gebruiken. Het prestatiegetal kan voor elk type CCD signaalprocessor gebruikt worden. Een nieuwe methode wordt gegeven om op een passieve manier een integrator na te bootsen, die de mogelijkheid biedt zeer dicht bij de theoretische ruisgrens te komen.

In **Hoofdstuk 5** wordt een nieuwe methode bediscussieerd om de zwevende diffusiedetector te gebruiken. De ladingspakketjes worden dan opgevat als een elektrische stroom in plaats van een serie individuele ladingspakketjes. De stroom wordt via een weerstand omgezet in een spanning, dit in tegenstelling tot de benadering waarbij ladingspakketjes via een capaciteit in spanning omgezet worden. De stroombenadering leidt tot een uitleesmethode, waarin geen resetruis gegenereerd wordt. In dit hoofdstuk worden criteria vastgesteld die de ruisprestatie bepalen. In essentie kan men gelijke tot betere ruisgetallen bereiken met deze criteria dan met de klassieke wijze van het uitlezen van de zwevende diffusie detector, die gevolgd wordt door een Correlated Double Sampler. Het grootste probleem voor een praktische implementatie is de realisatie van

de on-chip terugkoppelweerstand, die groter moet zijn dan vele MΩ en nauwelijks extra capaciteit mag toevoegen. Er wordt een implementatie gegeven, waarin de reset-FET gebruikt wordt als (niet lineaire) terugkoppel weerstand.

STABILITY ANALYSIS AND DESIGN OF BANDPASS SIGMA DELTA MODULATORS

J.A.E.P. van Engelen
6 mei 1999
Promotors: prof.dr.ir. R.J. van de Plassche en
prof.dr.ir. W.M.G. van Bokhoven

Sigma delta modulatie is een zeer bruikbare en veel toegepaste techniek voor hoge kwaliteit analoog-digitaal (A/D) omzetting van smalbandige signalen. Door het gebruik van overbemonstering en negatieve terugkoppeling worden de kwantisatiefouten van een grove kwantisator in een smalle signaalband aan de uitgang van de modulator onderdrukt. Banddoorlaat sigma delta modulatie is zeer geschikt voor de A/D omzetting van smalbandige signalen die op een draaggolf zijn gemoduleerd. Deze signalen komen veelvuldig voor in communicatiesystemen zoals AM/FM ontvangers en mobiele telefoons.

Als gevolg van de niet–lineariteit van de kwantisator in de terugkoppellus kan de stabiliteit van een sigma delta modulator afhankelijk zijn van de ingangssignalen. Echter, de niet–lineariteit in de terugkoppellus bemoeilijkt de stabiliteitsanalyse. In dit proefschrift is de beschrijvende functie methode gebruikt om de stabiliteit van sigma delta modulatoren te analyseren. Het vaak gebruikte lineaire versterkingsfactor model voor de kwantisator is niet voldoende om klein–signaal stabiliteitseigenschappen en "idle patterns" (rust patronen) nauwkeurig te voorspellen. Dit lineaire model is daarom uitgebreid met een fase verschuiving. Uit analyse blijkt dat de fase verschuiving van een bemonsterde kwantisator in feite een fase onzekerheid is. Door middel van een stabiliteitsanalyse met het uitgebreide model kunnen "idle patterns" nauwkeurig worden voorspeld en klein–signaal stabiliteitsgrenzen voor lusfilterparameters nauwkeurig worden berekend. Een vereenvoudigde vuistregel, afgeleid van deze stabiliteitsanalyse, is toegepast op banddoorlaat sigma delta modulatoren.

De stabiliteitseigenschappen hebben een aanzienlijke invloed op het ontwerp van één–bit, hogere orde continue–tijd banddoorlaat sigma delta modulatoren met een enkelvoudige terugkoppellus. De structuur van een continue–tijd banddoorlaat lusfilter moet voldoende vrijheidsgraden hebben om het gewenste (klein–signaal stabiele) sigma delta modulator gedrag te verkrijgen.

Twee implementaties van banddoorlaat sigma delta modulatoren, gebaseerd op een gedefinieerde klasse van lusfilters, zijn ontworpen en getest. Beide modulatoren zijn afgestemd op 10.7MHz, een vaak gebruikte middenfrequentie in AM/FM ontvangers. Een vierde orde modulator behaalt een signaal–ruis verhouding (SNR) van 54dB (ofwel een resolutie van 8.5 bits) in een bandbreedte van 200kHz. Het lusfilter van de modulator is gerealiseerd met behulp van discrete componenten en bestaat uit een gecombineerde LC/g_mC resonator.

De tweede implementatie is een volledig geïntegreerde zesde orde modulator. Voor zover bekend bij de auteur, is deze modulator de eerste gepubliceerde banddoorlaat modulator met een enkele terugkoppellus en een lusfilterorde hoger dan vier. De modulator is gerealiseerd in een 0.5m CMOS process en behaalt een SNR van 67dB (ofwel 10.5 bits) in een bandbreedte van 200kHz en 80dB (13 bits) in een bandbreedte van 9kHz. De derde orde intermodulatie producten liggen meer dan 80dB beneden de vermogens van de ingangssignalen. Het banddoorlaat modulator IC verbruikt 60mW bij een voedingsspanning van 5V.

AVERAGE PERFORMANCE CONROL FOR SYSTEMS WITH PARAMETRIC UNCERTIANTY

Y. Boers
18 februari 1999
Promotors: prof.dr.ir. P.P.J. van den Bosch
prof.dr. A.A.H. Damen

In veel dynamische systemen wordt een regelaar gebruikt om het systeem gedrag zo te veranderen dat het geregelde systeem beter presteert dan het ongeregelde systeem. In veel regelaar ontwerp strategieën wordt gebruik gemaakt van een (wiskundig) model van het systeem om in staat te zijn een regelaar te ontwerpen die de prestatie van het geregelde systeem verbetert. De nauwkeurigheid of de kwaliteit van dit model bepaalt voor een groot gedeelte de prestatie die uiteindelijk geleverd kan worden door het geregelde systeem, waarbij de regelaar is ontworpen op basis van het model.

Beschouw nu het geval waarin het te regelen systeem niet geheel bekend is. Ook in dit geval wil de ontwerper van de regelaar de prestatie van het geregelde systeem verbeteren door middel van het ontwerpen van een geschikte regelaar voor het (gedeeltelijk) onbekende systeem. Het ontwerpen van een regelaar voor een onbekend systeem of een niet exact gemodelleerd systeem heet *robuust regelaar ontwerp*. Een regelaar die een goede prestatie levert ondanks systeem- en/of modelonzekerheid wordt een *robuuste regelaar* genoemd.

Er bestaan veel verschillende robuust regelaar ontwerp strategieën. Deze zijn met name in de laatste twintig jaar ontwikkeld en bestudeerd. (Bijna) al deze strategieën hebben gemeen dat het zogenaamde *worst case* strategieën zijn. Dit houdt in dat een zeker prestatie niveau wordt gegarandeerd over de klasse van kandidaat modellen, feitelijk bepaalt het slechtste model in die klasse de prestatie die gehaald kan worden. Bij deze strategie wegen alle modellen even zwaar, dus geen enkel model wordt geacht beter te zijn dan een.

Er zijn echter legio (praktische) gevallen, waarin de waarschijnlijkheid dat een bepaald model in de klasse van kandidaat modellen het echte systeem beschrijft veel groter is dan de waarschijnlijkheid dat een ander model in diezelfde klasse het echte systeem beschrijft, Om deze relatieve verschillen in waarschijnlijkheid uit te drukken voorzien we de verschillende modellen van relatieve gewichten (een kansmaat). We richten ons voorts niet op worst case regelaar ontwerp, maar we zoeken een regelaar die gemiddeld gezien het best presteert, waarbij het gemiddelde over die klasse van kandidaat modellen wordt genomen, rekening houdend met de kansmaat die de relatieve waarschijnlijkheid van de verschillende modellen weergeeft. Als we ons op gemiddelde prestatie optimalisatie richten in plaats van op worst case prestatie optimalisatie voorkomen we dat een slecht model dat maar met een geringe waarschijnlijkheid het werkelijke systeem representeert een te groot stempel drukt op het regelaar ontwerp.

Omdat in het klassieke robuuste regelaar ontwerp, i.e. worst case ontwerp, statistische informatie met betrekking tot model onzekerheid niet gebruikt kan worden, mag verwacht worden dat in situaties waarin deze informatie voorhanden is, de klassieke ontwerpmethode tot conservatieve resultaten zal leiden in vergelijking met de voorgestelde robuuste regelaar ontwerpstrategie, i.e. gemiddeld prestatie ontwerp.

Het hoofdthema in dit proefschrift is het ontwerp van regelaars die gemiddeld gezien optimaal presteren, prestatie wordt gemeten in de zogenaamde $\mathcal{H}_2$ systeem-norm van het gesloten lus systeem. We zullen ons vooral richten op systemen waarvan de (fysische) parameters niet geheel bekend zijn. We zullen aannemen dat deze parameters waarden aannemen in een bepaalde verzameling en we zullen aannemen dat er een kansmaat op deze verzameling is gedefinieerd. Als een bepaalde waarde in deze verzameling met grote waarschijnlijkheid de juiste parameterwaarde is zal de kansdichtheid voor deze waarde een piek vertonen.

We bestuderen de afhankelijkheid van een optimale gemiddelde prestatie regelaar van de kansmaat, gedefinieerd op de onzekerheid. Verder zullen we noodzakelijke voorwaarden voor optimaliteit afleiden. We zullen een verband leggen en een vergelijk aanbrengen tussen het worst case ontwerp enerzijds en het gemiddelde prestatie ontwerp anderzijds. Er is ook een hoofdstuk opgenomen waarbij het gemiddelde prestatie ontwerp wordt gerealiseerd door middel van het doen van trekkingen. Dit zijn zogenaamde randomized algoritmes. De aanpak is er in dit geval op gebaseerd dat door het gebruik van algoritmes, die het toegestaan is in een (zeer) klein percentage van de gevallen waarin ze gebruikt worden niet juist te werken, we in staat worden gesteld de optimale gemiddelde prestatie regelaar te bepalen.

OPTIMIZATION OF THE CD-ROM SYSTEM TOWARDS HIGHER DATA THROUGPUTS

S.G. Stan
18 mei 1999
Promotors: prof.dr.ir. P.P.J. van den Bosch
prof.dr. A.A.H. Damen

Dit proefschrift houdt zich voornamelijk bezig met de verbetering van dataoverdracht bij CD-ROM drives. Aangezien de informatie uniform verdeeld langs een continue spiraal op de plaat vastgelegd is, zijn er hoge uitleessnelheden nodig om de data-overdrachtssnelheid te verbeteren. Omgekeerd geredeneerd, zou de plaat sneller moeten ronddraaien teneinde de gewenste lineaire snelheid, gemeten langs de spiraal, te bereiken.

Er zijn fundamenteel vier beperkende factoren van verschillende aard aan te duiden, die een simpele toename van de rotatiesnelheid van de plaat in de weg staan:

i. de bewerkingssnelheid voor de uitgelezen signalen wordt beperkt door de electronica in het decodeerkanaal;

ii. de rotatiesnelheid van de plaat wordt begrensd tot een bepaald, door de focus- en radile electromechanica gesteld maximum;

iii. de ontwikkeltijd, noodzakelijk om de voornoemde systeemgrenzen uit te breiden wordt beperkt door actuele eisen van de markt;

iv. de verkoopprijs wordt begrensd door een zeer sterke concurrentie tussen de fabrikanten van de onderhavige apparatuur.

Het proefschrift probeert het probleem van de toenemende overdrachtssnelheid van data op te lossen binnen de hiervóór opgesomde fundamentele, beperkende factoren. Een andere factor die in aanmerking genomen dient te worden bij het zoeken naar een optimale oplossing voor dit probleem, is de toegangstijd tot de gewenste data. Deze parameter wordt bepaald door de tijd, die nodig is om op de plaat naar de gewenste data te zoeken en deze vervolgens aan de gebruiker door te geven. Aangezien de toegangstijd binnen goed omschreven grenzen zou moeten liggen, moet deze beperkende factor ook in rekening gebracht worden.

Na een korte inleiding tot de CD-ROM technologie en de daaraan gerelateerde marktomgeving, wordt een systeemoverzicht gepresenteerd. Dit bestrijkt alle facetten van een CD-ROM apparaat, beginnend bij optiek en servomechanica, en eindigend met de gebruikersinterface. Het proefschrift geeft vervolgens een methode aan om de rotatiesnelheid van de plaatmotor in hogesnelheids CD-ROM apparaten te regelen. Verscheidene andere regelalgoritmes om de gemiddelde data-doorvoersnelheden te verbeteren worden hierbij tevens besproken. Deze algoritmes kunnen geoptimaliseerd worden en teneinde dit te bereiken, worden het noodzakelijke gereedschap, alsmede de daarbij behorende wiskundige benadering gedetailleerd gepresenteerd. Het proefschrift bespreekt voorts een methode om de intrinsieke fouten, die tengevolge van de roterende spiraalvormige plaatgroef optreden gedurende de data-toegang, te verminderen. Tenslotte wordt een speciaal type CD-ROM-systeem, dat gebruik maakt van twee optische units voor het leesdoeleinden en datatoegang, uitputtend beschreven. Laatstgenoemd systeem brengt de tijd, die nodig is om mechanisch de plaats te bereiken, waar de gewenste data zich bevindt, aanzienlijk terug.

Afgezien van voornoemd concept, dat een tweevoudige optiek gebruikt, zijn alle andere uitvoeringen toegepast in CD-ROM apparatuur, die door Philips Optical Storage in Eindhoven ontwikkeld werd. De inspanningen, die deze toepassingen vergden, bestrijken een tijdperk van circa zes jaar. Enkele ideëen, die aanvankelijk bedoeld waren om de data-overdracht in CD-ROM apparatuur te verbeteren, zijn recentelijk ook toegepast in één van zijn opvolgers, de DVD (Digital Versatile Disc) Videospeler.

LOW-CONFINEMENT HIGH-POWER SEMICONDUCTOR LASERS

M. Buda
14 januari 1999
Promotors: prof.dr. G.A. Acket
prof.Dr.-Ing. L.M.F. Kaufmann

In dit proefschrift worden de resultaten van een studie naar de optimalisatie van hoogvermogen halfgeleider laserdiodes uitgaande van het 'lage opsluitfaktor principe' gepresenteerd. Om verzekerd te zijn van een optimale indexgeleiding is een andere benaderingswijze bij het ontwerp van de transversale lagenstruktuur voor de groei en het processen van de plak na de groei nodig. Het 'lage opsluitfaktor principe' houdt in dat in transversale richting het maximum van de optische veldverdeling weggeschoven wordt van de aktieve laag om zo de afmeting van het nabije veld te vergroten, dat wil zeggen: de opsluitfaktor wordt verlaagd en daarmee wordt het maximaal haalbare uitgekoppelde optische vermogen voordat katastrofale optische schade (Catastrophic Optical Damage : COD) aan de spiegels optreedt vergroot.

Het modelleren van de golfgeleiding in transversale richting met behulp van de transfer matrix methode is in het algemeen betrouwbaar. De lagenstrukturen zijn zo ontworpen dat de absorptiecoëfficiënt lager is dan 1 cm^{-1} en de opsluitfaktor correspondeert met een spotafmeting d/Γ van ongeveer 0.8 – 1 μm. Vanwege het doordringen van het optische veld tot in de contactlagen kunnen er resonanties optreden. Omdat deze resonanties aanleiding geven tot verhoogde absorptie en vervormingen in het verre veld moeten ze in ons geval vermeden worden. Het effekt kan echter wel nuttig zijn voor andere bouwstenen en een aantal suggesties wordt gedaan voor de toepassing ervan in DFB lasers. Door lagere dopingniveaus dan normaal te gebruiken kunnen, zowel met MBE als met MOCVD groei, laserdiodes met een zeer lage absorptiecoëfficiënt, 1 – 1.5 cm^{-1}, reproduceerbaar gegroeid worden. Voor een 2 mm lange, 50 μm brede stripe laser met een asymmetrische transversale lagenstruktuur en een optische opsluitlaag werd een hoog uitgekoppeld optisch vermogen van 1.8 Watt CW per ongecoat facet verkregen. Vergeleken met de gangbare voor lage drempelstroom geoptimaliseerde strukturen is dit een verbetering met een faktor 2.5. Het COD niveau neemt als verwacht evenredig met de spotafmeting toe.

In de laterale richting neemt de ladingdrager geïnduceerde antigeleiding rechtevenredig met de opsluitfaktor af. Bij zwakke indexgeleiding kan voor uitgekoppelde vermogens tot ongeveer 1 W het optische veld zich in principe in de fundamentele mode bevinden. In de praktijk echter zorgen thermische- en stresseffekten voor de noodzaak via de technologie een minimum aan indexgeleiding te introduceren. De thermische effekten, die hier met behulp van gaingeleide lasers met een hoge drempelstroom geschat worden, kunnen worden geminimaliseerd door de drempelstroom laag te houden. In 8 μm brede stripe lasers en bij een stroomdichtheid van 2500 A/cm^2 is thermische golfgeleiding verantwoordelijk voor een verandering in de effektieve brekingsindex van naar schatting $\Delta n_{eff} \approx 10^{-3}$. Er blijken onverwachte effekten op te treden in de tijdresponsie van versterkingsgeleide en zwak indexgeleide lasers. De drempelstroomdichtheid hangt af van de pulsbreedte en neemt, in tegenstelling tot wat we zouden verwachten, af als de pulsbreedte toeneemt van 100 ns tot 10 μs. Afhankelijk van het device kan deze afname oplopen tot 50 %. Ook blijkt er een signifikante vertragingstijd te bestaan tussen de elektrische en optische puls. Deze vertragingstijd kan zelfs 3 – 5 μs bedragen en neemt af boven de drempel. Ook wanneer de vertragingstijd verwaarloosbaar klein is neemt de optische puls in de eerste paar microseconden geleidelijk toe. De vertraging tussen de elektrische en optische puls en de afhankelijkheid van de drempelstroom van de pulsbreedte zijn bij zwak indexgeleide lasers in mindere mate aanwezig en worden verwaarloosbaar als $\Delta n_{eff} > 2 \times 10^{-3}$. Boven de drempel echter wordt de vorm van de optische puls sterk beïnvloed door de aanwezigheid van de eerste of hogere orde modes. In samenhang met de vervorming van de optische puls wordt het verre veld instabiel en verbreedt het spectrum ten gevolge van thermische drift. Zeer vaak wordt eerst een 'hybride kink' waargenomen die, wanneer de eerste orde mode niet langer fasegekoppeld is met de fundamentele mode, snel verandert in een 'eerste orde kink'. Bij hogere injectieniveaus vertonen devices vaak multimode gedrag en oscilleert de optische puls tussen de modes. Voor ongecoate 13.5 μm brede stripe lasers is het maximale uitgekoppelde vermogen in de fundamentele mode 200 – 230 mW/facet. Dit vermogen is thermisch begrensd. Er werden metingen uitgevoerd onder gepulsde condities met 10 – 30 μs pulsbreedte en 10 ms tussen de pulsen. De hiermee corresponderende stroomdichtheid is 2500 – 3000 A/cm^2 hetgeen in overeenstemming is met het in *paragraaf 2.3* gepresenteerde optische model. Variaties in de effec-

tieve brekingsindex geïnduceerde door de mechanische spanning, het z.g. fotoelastische effekt, kunnen, afhankelijk van de spanning in de oxidelaag en de vorm van de ridge, in zwak indexgeleide lasers belangrijk worden. Ze worden hier theoretisch en experimenteel bepaald voor een golfgeleider laser diode met een geëtste ridge. Er kan een antigeleiding van $\Delta n_{eff} \approx 8 \times 10^{-4}$ optreden onder de stripe wat belangrijke verstoringen aan de randen van de stripe tot gevolg heeft. Samen met thermische effekten maakt dit een minimum aan technologisch te introduceren golfgeleiding nodig.

De drempelstroomdichtheid en haar temperatuurafhankelijkheid, de schijnbare interne efficiëntie boven de drempel en de geïnjecteerde ladingdragerdichtheid in de barrière en optische opsluitlagen werden zowel theoretisch als experimenteel bestudeerd. Als slechts het klassieke drift-diffusie model werd gebruikt bij het ontwerpen, werden experimenteel lagere waarden voor de interne efficiëntie en hogere waarden voor de stroomdichtheid gemeten in vergelijking tot het model. We hebben dit gegeven toegeschreven aan de minder efficiënte invangst van ladingdragers in de quantumput. Hierdoor is de ladingdragerconcentratie in de barrière lagen beduidend hoger dan voorspeld wordt door het klassieke drift-qdiffusie model.

Na optimalisatie van de aktieve laag en de barrière/opsluitlaag configuratie werd het doel van het lage opsluitfaktor ontwerp bereikt: we konden voor onze devices een drempelstroomdichtheid van 300 A/cm^2, een absorptiefaktor van 1 cm^{-1} en, voor ongecoate facetten, een CW vermogen van 36 mW/μm meten. De serieweerstand is ongeveer 2×10^{-4} Ωcm^2, hetgeen vergelijkbaar is met de typische weerstanden voor gebruikelijke symmetrische ontwerpen. Dit is een gevolg daarvan dat, alhoewel wat lager gedoteerd dan normaal, de dikte van de p- opsluitlaag lager is dan gebruikelijk en het maximum van de optische veldverdeling verschoven is naar de n-type lagen.

Om de stripe van de laserdiode te definiëren is herhaalde anodische oxidatie toegepast. Hoewel anodische oxidatie een bekend proces is voor GaAs zijn er in de literatuur erg weinig gegevens te vinden voor $Al_xGa_{1-x}As$. De etssnelheid van het materiaal neemt sterk af naarmate het Al gehalte x in de laag toeneemt. In dit werk wordt eveneens verslag gedaan van ons onderzoek naar de etssnelheid van het materiaal als funktie van het Al gehalte en naar het etsprofiel voor laserstrukturen die op een n^{++} substraat zijn gegroeid. Het blijkt dat de resultaten een buitengewone controle bieden over de etsdiepte: een nauwkeurigheid van 20 – 30 nm bij een totale etsdiepte van 1 μm is haalbaar. Helaas kan deze methode alleen gebruikt worden voor stripes breder dan 10 μm omdat het profiel een sterke onderets vertoont voor GaAs/$Al_{0.6}Ga_{0.4}As$ configuraties zoals gebruikt in de laserstrukturen. Als maar één materiaal, b.v. GaAs, wordt geëtst is het profiel normaal, d.w.z. de etsdiepte is nagenoeg gelijk aan de onderets. Zo gauw het $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$ grensvlak wordt overschreden treedt een sterke onderets op in het profiel.

Als een laatste conclusie kunnen we stellen dat het 'lage opsluitfaktor concept' in laserdiodes zeker voordelen biedt ten opzichte van het klassieke ontwerp en dat het de moeite waard is dit concept verder te ontwikkelen voor toepassing in commerciële CW lasers. Met geschikte spiegelcoatings zou het uitgekoppelde laservermogen met nog een faktor 3 kunnen worden vergroot.

Met betrekking tot het laterale gedrag is de getaperde laser met een lage opsluitfaktor een interessante toekomstige ontwikkeling. Omdat er hierin minder antigeleiding optreedt zou laserwerking in de fundamentele mode tot hogere uitgekoppelde vermogens mogelijk moeten zijn. Bij emitters in de fundamentele modus met een lage drempelstroomdichtheid moeten spanningsgeïnduceerde effekten geminimaliseerd worden door een zorgvuldige keuze van de depositieparameters, de dikte en de warmtebehandeling van het oxide dat het injectiegebied buiten de ridge bepaalt.

DIELECTRIC BREAKDOWN IN INSULATING GASES

SPACE CHARGE EFFECTS AND NON-UNIFORM FIELDS

E.H.R. Gaxiola
15 maart 1999
Promotors: prof.dr.ir. P.C.T. van der Laan
prof.dr. F.J. de Hoog

Dit werk betreft de studie van diëlektrische doorslag in isolerende gassen, in homogene en inhomogene elektrische velden en in de aanwezigheid van ruimteladingseffecten. Lawines en "streamers" in elektrisch isolerende gassen zijn het onderwerp van studie; meer in het bijzonder in stikstof, droge lucht en sulfurhexafluoride. Het doel van dit werk is het ontwikkelen van ontladingsmodellen voor in de praktijk voorkomende isolatiegeometrieën op basis van een fysische beschrijving van doorslagprocessen.

De modellering van diëlektrische doorslag, de fysica erachter, de mathematische beschrijving en de numerieke technieken, alsook de vertaling van fysische fenomenen in meetbare grootheden worden toegelicht. Hierbij worden ook de beperkingen van de gebruikte methoden gepresenteerd.

Ontwerpaspecten van voordoorslagmetingen en de daaruit gerealiseerde experimentele opstelling met meetprocedures worden beschreven. Tijdopgeloste optische en elektrische metingen alsook tweedimensionale (2-D) modelcomputersimulaties worden gepresenteerd. Resultaten van 2-D computer simulaties van elektrische ontladingen in stikstof en in droge lucht worden besproken. Het gepresenteerde model wordt gebruikt voor het verkrijgen van meer inzicht in processen die voorafgaan aan de doorslag, door vergelijking van gemeten en gesimuleerde data. Resultaten voor doorslag in homogene velden met en zonder ruimteladingseffecten, doorslag in inhomogene velden en voor doorslag langs vastestof isolatoren worden gepresenteerd.

Lawine-experimenten in een niet-elektronegatief gas (N_2), tezamen met de model uitkomsten, worden gepresenteerd, gevolgd door experimenten en simulaties voor elektronegatieve gassen (lucht en SF_6).

De stadia van lawine-"streamer" overgang en de initiatie van diëlektrische doorslag in N_2, lucht en SF_6 worden gepresenteerd. De processen verantwoordelijk voor "streamer" vorming worden besproken. De trends van meetbare externe grootheden corresponderen met de uitkomsten van ons model.

Deeltjesdichtheidsverdelingen geven meer inzicht in het gedrag voorafgaand aan de doorslag. Hieruit kunnen de relevante processen en parameters bepaald worden om daarmee het complexe hydrodynamische model te kunnen "strippen" en zo te komen tot vereenvoudigde modellen.

De tijd tot doorslag en de elektronen oversteektijd in een homogeen veld worden berekend als functie van het aangelegde elektrische veld, het aantal startelektronen, de druk en het gereduceerde veld E/p. De uit het model volgende gesimuleerde tijd-tot-doorslagkrommen zijn vergeleken met, en corresponderen met experimentele waarnemingen.

Een experimentele studie van het gedrag voorafgaand aan doorslag in droge lucht langs isolatoren van verschillende vorm wordt gepresenteerd.

Een toepassing van de gevonden inzichten van het werk aan voordoorslag processen in gassen is partiële ontladingen in holtes in vaste stof isolatiematerialen. Een tijdopgelost model voor partiële ontladingen in holtes en een tijdopgeloste studie van de fysische processen bij partiële ontladingen worden gepresenteerd. De invloed van het diëlektrische materiaal op de partiele ontladingen in holtes en de partiële ontladingsdetectie in isolatoren worden geïllustreerd; tezamen met schaalwetten en praktische implicaties. Resultaten van partiële ontladingsmetingen en modellering aan micrometer holtes in vaste stof diëlektrica worden gepresenteerd. Holtes met afmetingen tot 10 μm zijn bestudeerd. De resultaten suggereren niet het bestaan van een minimaal detecteerbare holte afmeting. Voor micrometer holtes verandert het ontladingsgedrag van een gasontladingsachtige lawine en een "streamer" doorslag naar een "spark"-achtig plasma.

Tot slot wordt een analyse en discussie van de relevante delen van het hydrodynamische (vloeistof) model voor verschillende gassen en condities gepresenteerd. Door middel van parametervariaties is hierin meer inzicht verkregen.

Zowel ruimtelading en veldinhomogeniteiten beïnvloeden de ontwikkeling van de primaire lawine tot een diëlektrisch doorslaggedrag. Het werk in deze dissertatie, gebaseerd op een combinatie van tijdopgeloste elektrische en optische metingen, en simulatie studies met een 2-D hydrodynamisch model, hebben geleid tot een fysische beschrijving van de verantwoordelijke mechanismen en ontwikkelingsfasen voor:

- N_2, droge lucht en SF_6
- homogene en inhomogene velden

- doorslag langs isolatoren in droge lucht
- holtes in vaste stof diëlektrica.

ANALYSIS AND DESIGN OF POWER SYSTEM PROTECTIONS USING GRAPH THEORY

S.M. Madani
2 juni 1999
Promotors: prof.dr.-ing. H. Rijanto
prof.dr.ir. P.C.T. van der Laan

De belangrijkste taak van de beveiliging in elektriciteitsnetten bestaat uit het onmiddellijk uit bedrijf nemen van netcomponenten die in een abnormale toestand geraken. Aan de andere kant wordt van de beveiliging verlangd dat, bij het optreden van een fout, zo weinig mogelijk verbruikers worden afgeschakeld. Behalve deze eisen, behoort de beveiliging zo betrouwbaar, snel, eenvoudig en goedkoop mogelijk te zijn. Om deze doelen te bereiken moet aan het beveiligingssysteem een goed ontwerp ten grondslag liggen. Bovendien moeten de betreffende beveiligingsrelais op de kleinst mogelijke vertragingstijden worden ingesteld waarbij de coördinatie tussen alle relais moet blijven gehandhaafd. Deze gecoördineerde instellingen moeten vaak hernieuwd berekend worden bij veranderingen in de belastingstoestand en in de topologie van het net.

Tot heden worden beveiligingssystemen ontworpen door experts en is het ontwerp gebaseerd op hun praktische ervaring en hun persoonlijke filosofie. Hierdoor zijn bestaande beveiligingssystemen vaak niet optimaal gekozen in technisch of economisch opzicht. In deze dissertatie wordt een nieuwe analytische methode gepresenteerd voor het ontwerpen van een beveiligingssysteem voor een willekeurig elektriciteitsnet, gebruikmakend van relais met zo eenvoudig mogelijke functionaliteit.

De voorgestelde ontwerpmethode vereist een analyse van de onderlinge afhankelijkheid tussen de diverse relais van een beveiligingssysteem. Aangezien de bestaande analyse methoden omslachtig zijn, is een groot deel van de studie besteed aan de ontwikkeling van twee nieuwe op de graaftheorie gebaseerde methoden voor de topologische analyse van beveiligingssystemen (hoofdstukken 4 en 5). Door de toepassing van regels gebaseerd op de graaftheorie, wordt het probleem van de topologische analyse gereduceerd en gesplitst in deelproblemen. Daardoor zijn deze analysemethoden sneller en eenvoudiger dan de bestaande. Vanwege zijn eenvoud kan de tweede methode, gepresenteerd in hoofdstuk 5, handmatig worden toegepast voor elk net dat enkel richtingsgevoelige relais bevat.

Bovendien kan door toepassing van de voorgestelde methode voor de topologische analyse de coördinatie procedure aanzienlijk versnelt worden waardoor de realisering van een adaptieve beveiliging mogelijk wordt, in staat om zichzelf aan te passen aan veranderingen in topologie en belastingstoestanden.

De ontwerpmethode wordt gedemonstreerd voor twee Nederlandse elektriciteitsnetten. In vergelijking met de gebruikelijke ontwerpmethode resulteert de voorgestelde methode in een eenvoudiger en/of sneller beveiligingssysteem.

WERKEN AAN EEN PROMOTIE-ONDERZOEK: JE HEBT VEEL VRIJHEID, MAAR HET HOUDT OOK RISICO'S IN.

Interview met ir. D. Remondo Bueno
Universiteit Twente

Geboren en getogen in Spanje, studeerde de heer Remondo Bueno natuurkunde aan de Universiteit van Cantabria. In Spanje kan men Elektrotechniek studeren als een specialisatie binnen de faculteit Natuurkunde.

Als student reisde de heer Remondo Bueno in 1990 af naar Nederland om te werken aan een afstudeeropdracht aan de TU Eindhoven.

Kort na zijn afstuderen begon hij aan een tweede faseopleiding. Dat werk vond plaats bij het 'Eindhoven International Institute' dat verbonden was aan de TU Eindhoven. Daar verwierf hij in 1992 de Masters degree in de elektrotechniek.

Vervolgens was de heer Remondo Bueno gedurende 3 jaar als onderzoeker werkzaam in Spanje bij het research instituut CEIT. Het werd allengs duidelijk dat voor hem, als niet gepromoveerde onderzoeker, er niet zoveel perspectief was voor een carrière in de wetenschap. Ook de mogelijkheden om te promoveren waren niet kansrijk. Dat was de reden waarom hij in 1995 die mogelijkheid in Nederland ging onderzoeken. Bij de Universiteit Twente was er een vacature waaraan een promotie opdracht was verbonden en dat leek een interessante uitdaging. De opdracht was in grote lijnen gedefiniëerd en het betreft de prestatie-analyse van optische communicatie systemen. Op het gebied van prestatie-analyse van communicatiesystemen in het algemeen wordt veel onderzoek verricht. Optische communicatie systemen hebben echter een eigen problematiek, omdat de bronnen en de transmissielijnen specifieke eigenschappen hebben. Zo zijn de bronnen in een optisch systeem veelal lasers; deze hebben andere eigenschappen dan antennes. Dit resulteert bijvoorbeeld in faseruis en dat heeft invloed op de prestatie van een systeem. Die prestatie wordt vaak uitgedrukt in de bitfoutenkans. Kenmerkend voor optische systemen is de zeer lage waarde van die kans, n.l. in de grootteorde van 10^{-9}. Ter vergelijking: bij mobiele netwerken is die kans ca. 10^{-4}.

Die lage foutenkans bij optische communicatie systemen vormt een probleem bij de prestatie-analyse. Er zijn verschillende strategieën mogelijk:

- de puur theoretische analyse, maar die is moeilijk uitvoerbaar.
- de methode van benaderingen; deze methode zou wel gebruikt kunnen worden voor applicaties, echter de nauwkeurigheid laat vaak te wensen over.
- het uitvoeren van computersimulaties; het nadeel hiervan is dat deze vanwege de extreem lage foutenkans een zeer lange doorlooptijd vergen.
- het uitvoeren van experimenten; ook hiervoor geldt dat dit niet eenvoudig uitvoerbaar is. Uiteraard zijn experimenten wel noodzakelijk om een zekere verificatie van uitkomsten te verkrijgen.

Deze eerste verkenning was het resultaat van enige maanden onderzoek.

Bij litteratuuronderzoek werd toen kennis gemaakt met een nieuwe techniek, n.l."importance sampling". Het betreft een methode op het gebied van statistiek en kansrekening om de nauwkeurigheid van de conventionele (Monte Carlo) simulatie groter te maken. In de praktijk betekent het toepassen van importance sampling dat men minder monsters nodig heeft. De methode op zich was reeds aan het eind van de jaren 60 bekend, maar er was daarna weinig of niets meer mee gebeurd.

Het leek een interessante optie om de techniek van importance sampling bij dit onderzoek naar prestatie analyse toe te passen. Dit bleek niet eenvoudig te zijn.

Als onderdeel van het promotie onderzoek werden daarom algemene richtlijnen uitgewerkt om de methodologie van importance sampling toe te passen.

Het tweede belangrijke onderdeel betreft de toepassing in communicatiesystemen, zowel cellulair mobiele- als ook optische netwerken. Op die wijze werden nieuwe resultaten bereikt omtrent de invloed van verschillende systeemparameters. Ook kunnen op basis van het onderzoek nu met grotere nauwkeurigheid schattingen gemaakt worden van bijvoorbeeld de invloed van overspraak in optische WDM-systemen (WDM = Wavelength Division Multiplexing). Daarbij was de vraagstelling vooral: hoe goed moeten de componenten zijn om een bepaalde bitfoutenkans te realiseren? Optische communicatiesystemen, met name WDM, zullen veel gebruikt worden om de 'backbone' netwerken te implementeren. Experimenten die de gehele prestatieana-

lyse kunnen ondersteunen werden wel uitgevoerd, maar de resultaten daarvan zijn nog niet geheel uitgewerkt. De praktische uitkomst van dit promotie onderzoek kan men omschrijven als: de mogelijkheid tot het realiseren van optische communicatiesystemen met de aanwezigheid van overspraak en het doen van betrouwbare voorspellingen daarover.

Op de vraag of er buiten de universitaire wereld belangstelling voor de uitkomsten van dit onderzoek zou kunnen bestaan, is het bescheiden antwoord van de heer Remondo Bueno dat deze technieken nog onvolwassen zijn en nog veel beter gemaakt kunnen worden. Kijkend naar de ontwikkelingen op het gebied van de 3e generatie cellulaire mobiele systemen zou dit een mooi hulpmiddel kunnen zijn.

Ook de toepassingen van importance sampling op andere terreinen lijken interessant. Als mogelijke toepassingen kunnen genoemd worden:

- wachtrij problemen
- optimalisatie vraagstukken van het type "travelling salesman"
- betrouwbaarheids vraagstukken, vooral waarbij het systemen betreft met een zeer lage waarschijnlijkheid in een fouttoestand te komen
- financiële voorspellingen
- overige vraagstukken waarbij sprake is van lage kanswaarden, bijv. aardbevingen.

Het proefschrift is nu praktisch klaar en het gaat medio november naar de commissie.

Stellingen heeft de heer Remondo Bueno nog niet. Het lastige van stellingen vindt hij, dat daarmee een verkeerde indruk van het onderzoekwerk en de resultaten zou kunnen ontstaan.

De promotie zal op 28 januari 2000 plaatsvinden.

Hoe kijkt hij nu terug op deze periode van het promotieonderzoek?

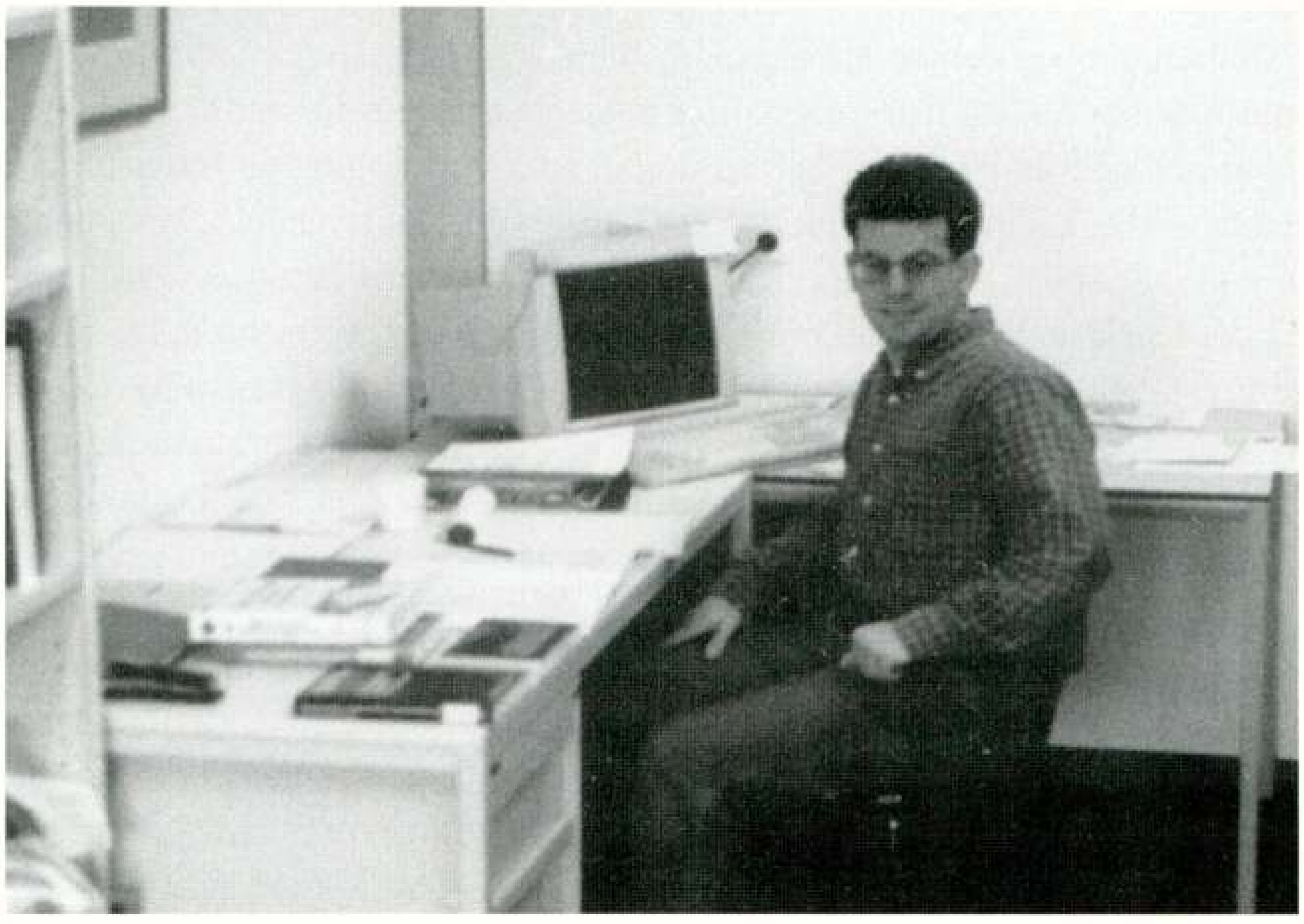
> 'Ik ben niet alleen geweest en heb met een aantal mensen goed kunnen overleggen over het onderzoek. Je hebt veel vrijheid en dat heb je uiteraard ook nodig. Maar er zit aan zo'n promotie-onderzoek ook een zeker risico vast. Vooral de eerste 1,5 jaar heb ik die onzekerheid ook ervaren; het is namelijk niet uitgesloten dat je op een geheel verkeerde weg bent en dat je onderzoek vastloopt. Maar de positieve kant ervan is dat je nu hebt aangetoond je eigen weg te kunnen zoeken. Daarom voel ik me sterk aangetrokken tot het onderzoekswerk.'

De omgeving en het werken bij de Universiteit Twente bevallen de heer Remondo Bueno goed en hij heeft inmiddels een aanstelling als universitair docent op zak. In die nieuwe functie wil hij het onderzoekswerk combineren met het onderwijs. Juist de combinatie maakt het interessant.

---

11 november 1999
Arie Spanjersberg

Ir. Bueno Remondo bij het begin van zijn aio-schap



DIGITALE SYSTEMEN EN DIGITALE SCHAKELINGEN

NEURAL HARDWARE SUPPORT FOR SPECTRAL ANALYSIS METHODS

L. Redei
8 januari 1999
Promotor: prof.dr. H. Wallinga.

This thesis deals with the concept of using neural networks for spectral analysis. It was shown by simulation of the so-called backpropagation neural networks that these can help interpretation of spectroscopic ellipsometry data. The simulations of Fried and Masa [Fried and Masa 1994] were repeated and extended to wider range of structural parameters and different wavelength intervals. Real-world measurements of Vanhellemont were also used for the evaluation of neural network performance, with success. It was found that backpropagation ANN'S can be used for retrieving material parameters of multi-film material structures (thickness and composition values of the layers) from SE or SR spectra.

During neural network training some examples remain poorly-learnt. Those are outliers, but can cause erroneous results in a successive evaluation based on them as first estimations. Those outliers can be eliminated by a proposed modification [Rédei and Wallinga 1997] of the backpropagation training algorithm, which constrains the error of approximation. The modification was introduced in Chapter 4.

This feature of the modification allows for constructing a set of neural networks for successive neural approximation [Rédei et al. 1998]. As it was shown in Chapter 4 the successive approximation can be continued until the theoretical precision of the measurement method is reached, if enough successive steps are implemented in (software-simulated) neural networks.

It was proven in Chapter 4 that the neural networks trained on a narrow range of parameters (when there is an anticipated value of the parameters, e.g. in semiconductor processes) can be used for direct evaluation of spectra without the need for a numerical fitting procedure. This speeds up the evaluation procedure and makes an online mapping of wafers possible during manufacturing [Rédei et al. 1998(c)].

In Chapter 5 one can find proofs of the applicability of the neural algorithm for SE and SR evaluation. That chapter also introduces the tolerance of the neural method in association with feasibility simulations for a proposed hardware implementation [Rédei et al. 1997]. The simulations presented there were performed using the software-tools written especially to facilitate the modified version of the backpropagation algorithm detailed in Chapter 4.

A digital backpropagation neural network hardware, based on the simulations, was designed. The details of the design are presented in Chapter 8. An attempt was made for the maximisation of the precision/size ratio. The size of a neuron is dependent on the precision of weight storage and computations. A workaround of this issue is a 'trick' of scaling the weights individually in each neuron of a system. Another important point is the implementation of the non-linear activation function [Rédei and Wallinga 1998]. A stepwise approximation of that non-linear function is introduced. The hardware implementation of the half-sigmoid (half of the centrally symmetric nonlinear function) requires only 19 logical gates. The area of the circuitry is only 5% of the storage (SRAM) area necessary to store the half-simoid at a maximum available precision.

The compact neuron was implemented in hardware and the test results presented in Chapter 9 proved its applicability. Assuming such neurons as network elements, a complete reflectometric system was designed [Rédei et al. 1998(b)]. The system was designed as a compact, one-package device. The results of the system simulations were positive, and proved its applicability for real-world analytical tasks. In lack of financing the whole system was not implemented.

OBJECT RECOGNITION WITH STEREO VISION AND GEOMETRIC HASHING

H.A.L. Dijck
5 februari 1999
Promotor: prof.dr.ir. P.P.L. Regtien

Het onderwerp van dit proefschrift is de automatische herkenning van voorwerpen met behulp van digitale camerabeelden. De discussie is beperkt tot de herkenning van door de mens gemaakte voorwerpen die

kunnen worden beschreven met deterministische, geometrische modellen. Toepassingen van dit soort herkenningstaken zijn te vinden in de industrie. Systemen voor de herkenning van voorwerpen worden bijvoorbeeld gebruikt voor de inspectie van producten en toegepast in de robotica voor het vinden van de door de robot benodigde voorwerpen.

Het proefschrift bespreekt een herkenningssysteem dat is gebaseerd op een combinatie van stereobeelden en geometrische indexering (geometric hashing). Deze combinatie maakt het mogelijk om 3-D voorwerpen te herkennen op een relatief eenvoudige manier. De herkenning maakt gebruik van lokale kenmerken uit de beelden. Door het gebruik van stereobeelden is het mogelijk om de 2-D kenmerken uit de beelden te combineren tot 3-D kenmerken. De 3-D kenmerken worden vergeleken met de 3-D modellen van de voorwerpen door een 3-D variant van het zogenaamde geometric hashing algoritme.

De interessante, nieuwe aspecten van deze aanpak zijn de manier waarop het correspondentieprobleem wordt aangepakt en de 3-D implementatie van het geometric hashing algoritme. Het correspondentieprobleem wordt slechts gedeeltelijk opgelost tijdens het combineren van de 2-D kenmerken (punten en lijnen) uit de beelden. Iedere combinatie van 2-D kenmerken uit de beelden die voldoet aan de fundamentele geometrische eisen, wordt gebruikt om een 3-D kenmerk te reconstrueren. Daardoor ontstaan veel onjuiste 3-D kenmerken die geen al te grote invloed mogen hebben op het herkenningsresultaat. Een 3-D implementatie van het geometric hashing algoritme vergelijkt de 3-D kenmerken met de modellen van de voorwerpen. De meeste implementaties van het geometric hashing algoritme die worden besproken in de literatuur zijn 2-D implementaties die de 2-D beeldkenmerken vergelijken met projecties van de 3-D modellen.

De modellen beschrijven de voorwerpen als een verzameling van (hoek-)punten en lijnstukken. Dankzij deze combinatie van 3-D punten en lijnen is een efficiëntere indexering mogelijk met het geometric hashing algoritme dan mogelijk zou zijn met alleen punten of lijnen. Voor het geometric hashing algoritme is het noodzakelijk om een coördinatensysteem te definiëren gebaseerd op een verzameling van de kenmerken. Dit gaat het beste met een combinatie van 3-D punten en 3-D lijnen.

De experimenten tonen aan dat het herkenningssysteem in staat is om de voorwerpen te vinden, zelfs wanneer die gedeeltelijk aan het zicht onttrokken zijn, en in geval van niet optimale belichtingsomstandigheden (schaduwen en reflecties). Het herkenningssysteem behaalt betere resultaten dan een systeem dat gebaseerd is op een 2-D variant van het geometric hashing algoritme. Het verlies van een deel van de 3-D informatie in het 2-D systeem leidt tot veel onjuiste oplossingen, in tegenstelling tot in het 3-D systeem. Met het 3-D systeem kan in scènes die maximaal 1000 3-D kenmerken genereren, 77% van de voorwerpen correct detecteerd worden. Dit resultaat kan nog verder verbeterd worden door een beter algoritme te gebruiken voor de eindcontrole van de resultaten.

MULTI-SENSOR OBJECT RECOGNITION: THE CASE OF ELECTRONICS RECYCLING

E.R. van Dop
23 april 1999
Promotor: prof.dr.ir. P.P.L. Regtien

In automatische objectherkenningssystemen zijn metingen afkomstig van een enkele informatiebron niet altijd voldoende om de onderliggende scène te reconstrueren. Onvolledigheid,onnauwkeurigheid en onbetrouwbaarheid van de informatie laat vaak ruimte voor meerdere interpretaties van de omgeving die verenigbaar zijn met de beschikbare data. Combinatie van beschrijvingen van de scène afkomstig van meerdere sensoren kan in dit soort gevallen helpen om het aantal mogelijke interpretaties te reduceren. Dit proefschrift behandelt de onderwerpen die bij het ontwerp van een multi-sensor systeem voor objectherkenning een rol spelen en illustreert deze onderwerpen in het lichtvan een systeem voor de recycling van elektronische onderdelen die zich op printplaten bevinden.

Geïntegreerde schakelingen, elektrolytische condensatoren, batterijen en kristallen zijn de meest belangwekkende elektronische onderdelen die voorkomen op printplaten, want dit zijn herbruikbare objecten of objecten die schadelijk zijn voor het milieu wanneer ze worden verbrand. De vorm en het materiaal van de behuizing van deze elektronische onderdelen bevat voldoende aanwijzingen om deze te verdelen in de verschillende objectklassen. Om deze eigenschappen te bepalen is een prototype systeem ontwikkeld waarbij gebruik wordt gemaakt van sensoren die een hoogtekaart,een kleurenbeeld en een gedetailleerd beeld van de scène maken. Bovendien is een sensor toegepast die de geleidbaarheid van de behuizing van de onderliggende objecten kan vaststellen.

De beschrijving van de scène die door elke sensor is verkregen wordt omgezet in objectkenmerken die vol-

doende onderscheidend vermogen hebben om classificatie van de objecten mogelijk te maken. Dit proefschrift beschrijft uitsluitend de informatieverwerkingseenheid die is ontwikkeld om elektronische onderdelen met behulp van een hoogtekaart te herkennen. Het gebruik van een kleurenbeeld en geleidbaarheidsinformatie in het multi-sensor systeem wordt beschreven in het proefschrift van Kroupnova [48]. De toepassing van een gedetailleerd beeld van de scène wordt uitgebreid beschreven in Noordam's doctoraal scriptie [62]. De hoogtekaart die gebruikt wordt in het objectherkenningssysteem is gebaseerd op actieve optische triangulatie waarbij gebruik wordt gemaakt van de projectie van binaire patronen volgens het Gray-code schema. Deze techniek is gekozen vanwege de relatief lage ontwikkelingskosten,de hoge snelheid waarmee een hoogtekaart in potentie kan worden verkregen en de ongevoeligheid van de meetmethode voor radiometrische eigenschappen van de scène.

Objectherkenning met behulp van een hoogtekaart richt zichvoornamelijk op de vertaling van een set meetgegevens in geometrische objectkenmerken. Twee grondvormen zijn geselecteerd voor de herkenning van elektronische onderdelen op printplaten. Door middel van zogenaamde 'superquadrics' is het mogelijk de hoogteinformatie van vele verschillende objectoppervlakken te beschrijven,terwijl blokvormige modellen zijn gebruikt om efficiëntere herkenning van een belangrijke klasse elektronische onderdelen mogelijk te maken: de geïntegreerde schakelingen. Zowel voor de 'superquadric' als de blokrepresentatie is de best passende parameterisatie omgezet in de conditionele kans van de parameterisatie gegeven de aanwezigheid van een bepaald object.

Om integratie van informatie afkomstig van meerdere sensoren mogelijk te maken zijn de objecthypothesen van de afzonderlijke sensoren uitgedrukt in een gemeenschappelijke taal via het concept kans. Dit concept is erg handig, aangezien het beroemde theorema van Bayes een elegante oplossing biedt voor de combinatie van kansen. Echter, het kan alleen worden toegepast wanneer de kennis van het kansmodel compleet is. Dit betekent dat bepaalde parameters, zoals de a priori kansen betreffende de aanwezigheid van objecten in de scène, moeten worden vastgesteld via een leerproces. Hoewel dit leerproces gecompliceerd kan zijn, verdient de Bayesiaanse aanpak van combinatie van informatie in objectherkenningsproblemen de voorkeur boven de zogenaamde Dempster-Shafer aanpak en de convexe waarschijnlijkheidsrekening. Deze formalismen hebben weliswaar minder gegevens nodig om informatie te combineren, maar de noodzaak om aannamen te doen en benaderingen toe te passen wordt verschoven naar de besluitvormingsfase van het herkenningsproces.

Het multi-sensor systeem voor de herkenning van elektronische componenten is in de huidige vorm in staat 18 verschillende objectklassen te onderscheiden. Daarbij wordt een herkenningsgraad van 82% gehaald,hetgeen beduidend hoger is dan de herkenningsgraad van de afzonderlijke sensorsystemen. Het nut van meerdere sensoren in een herkenningssysteem is daarmee bevestigd. Toch moet de herkenningsgraad voorzichtig worden gehanteerd, want de geleidbaarheidssensor is nog niet geïmplementeerd in het systeem. Anderzijds is het aantal objecten dat kan worden herkend nog te beperkt voor industriële toepassingen. Desondanks kunnen er enkele belangrijke systeemeigenschappen worden opgemerkt. Ten eerste is het onderscheidend vermogen van het systeem hoog, omdat objecten die sterk op elkaar lijken nog kunnen worden onderscheiden. Daarnaast is de diversiteit van objecten die kunnen worden herkend hoog, als gevolg van de meerdere meetmethoden die in het systeem voorkomen.

POWER, NOISE AND ACCURACY CONSIDERATIONS IN CMOS MIXED SIGNAL APPLICATIONS

M.A.T. Sanduleanu
2 februari 1999
Promotor: prof.dr. H. Wallinga

The work presented in this thesis concerns power, noise and accuracy in mixed-signal applications. Along the material presented it is shown that power, noise and accuracy should be treated in an unitary way, the three terms being well interrelated. It is divided in a theoretical part which covers sub-micron digital and submicron analog and an applicative part where accuracy related power and noise related power is encountered.

The main part of the thesis deals with analog circuits working in a digital environment where the process has been optimized for digital applications. To get the best performance, knowing the limits of power in digital and clearly defining the environment where analog should work is a must. Starting from fundamental/physical limits we are discussing afterwards the practical limits of power in digital, mostly at the architecture level. The fundamental limits are asymptotic limits and they cannot provide realistic comparisons between possible solutions. At architecture level, it is possible to find relations between power and signal to noise which provide a comparison basis with analog solutions. A simple example of a digital filter shows how power can be saved at the architecture level. The possible ways to low-power in digital are being discussed which provide some input for the analog part of this thesis.

The general trend, in digital, to scale down the power supply makes the process of designing analog circuits a difficult task since most of the solutions valid for large supply voltages are not anymore useful due to the low voltage limitations. In all cases this yields an increase in power consumption. Besides, analog designers have to cope with second order effects generated by the incompatibility of the process with analog performance. Starting from general considerations and simple circuits, we have proven that DR$\times$Speed product is limited by power, topology and supply voltage regardless of the type of circuits: continuous time or sampled data, current-mode or voltage mode. Matching imposes also restrictions on the obtainable accuracy and that is why, accuracy related power consumption has been discussed. The theoretical background from Chapter 2 and Chapter 3 has been used in the applications part. Several examples have been chosen where accuracy driven power and noise driven power applies.

At low supply voltage, the key problem of analog signal processing functions is dynamic range reduction. For this reason, a key target is to keep the largest possible voltage swing. The first example is an OTA-C integrator with a high DR/P ratio. This is possible by keeping large swing for 0 tuning conditions. The second example is a current Gm-C integrator with high quality factor for low voltages. The power efficiency of the two designs has been discussed according to the theoretical background from Chapter 3. The two integrators presented above are used to realize the video filter from Cbapter 2 in an analog way and to make a comparison in power to the digital approach. The next example is a polyphase filter. Here selectivity is ensured by using polyphase signals instead of high-Q bandpass filters. Matching driven power consumption comes as a variable. By using the current Gm-C integrator, we have shown how to make a low power polyphase filter needed for image rejection in a mobile transceiver.

The next chapter considers the $1/f$ noise and offset in mixed-signal design where chopping can provide a solution to boost the dynamic range and accuracy. A method to use chopper modulation at high frequencies is introduced and a low-voltage, low-power, chopped transconductance amplifier for mixed analogue digital applications has been presented. This OTA is meant for high-end audio applications. Chopping and dynamic element matching allow low noise and low residual offsets up to 1 MHz. We show next that by using chopping techniques and a chopped OTA, the accuracy of a bandgap voltage reference can be improved about ten times without laser trimming and with the benefit of reducing the $1/f$ noise of the reference. The same chopped OTA for high-end audio applications has a power consumption of 600 μW while in the bandgap example the power consumption is 7.5 μW. This example explains why the term "low power" has to be related to the specific application and its own specs.

The next chapter focuses on the design and the realization of low voltage chopped amplifiers with rail to rail class AB output stages capable of chopping up to 1O MHZ, with low noise, high linearity and low residual offset. This amplifiers can be used for high-end audio applications in driving low-ohmic loads for portable applications. Low-power techniques at the highest level of abstraction as architectural level and algorithmic level can lead to power savings which cannot be obtained unless the complete system is taken into study.

Chapter 7 presents a 16-bit D/A interface with Sine approximation in the time-domain or frequency domain reconstruction filter as an example of a system where accuracy and noise give constraints on the power consumption of the system. Here, reducing power in the analog domain the power in the digital domain is also reduced while the best partitioning of the system in terms of power can be found. Compared to the standard solutions we have reduced about four times the number of coefficients of the FIR filter for the same requirements. With only 25 coefficients we get more than 50 dB stopband rejection of out of band noise. A differential solution was proposed to reduce the digital crosstalk and to increase the output signal swing. An analysis of the matching, noise and clock jitter has been attached.

HIGH EFFICIENCY AUDIO POWER AMPLIFIERS

DESIGN AND PRACTICAL USE

R.A.R. van der Zee
21 mei 1999
Promotor: prof.ir. A.J.M. van Tuijl

(Hoofdstuk 1) Audio versterkers moeten steeds meer vermogen leveren dankzij het toenemend dynamisch bereik van digitale geluidsdragers en het toenemende aantal kanalen per versterker. Het gevolg is dat de dissipatie stijgt, terwijl de fysieke afmetingen van veel apparaten juist afneemt. Hierdoor ontstaan warmteproblemen. Audio versterkers met een hoog rendement zijn daarom noodzakelijk. In draagbare apparatuur is een hoog rendement wenselijk om de levensduur van de batterijen te verlengen.

In bestaande versterkers worden bijna uitsluitend klasse AB versterkers gebruikt. Het theoretische rendement van een klasse AB versterker is weliswaar hoog voor een sinus op vol vermogen, maar voor audiosignalen is het een stuk lager dankzij de grote crest factor van deze signalen.

(Hoofdstuk 2) Toch wordt in de meeste literatuur die over dit onderwerp beschikbaar is het rendement gemeten met behulp van sinussignalen. Voor verscheidene versterkertypen geven deze metingen geen goede indicatie van de dissipatie voor audiosignalen in normale gebruiksomstandigheden. Metingen met behulp van audiosignalen zijn echter traag en gecompliceerd. Het is belangrijk om een testsignaal te hebben dat representatief is voor audio, zodat verschillende versterker topologieën makkelijk vergeleken kunnen worden.

Om zo'n testsignaal te maken, zijn van veel audiofragmenten de amplitude- en frequentieverdeling gemeten. Van de bestaande testsignalen, is het IEC-268 testsignaal representatief voor audio. Door middel van simulaties is vastgesteld dat de dissipatie die veroorzaakt wordt door verschillende geluidsfragmenten van hetzelfde vermogen slechts een kleine spreiding heeft, en dat het gemiddelde gelijk is aan de dissipatie die door het IEC testsignaal veroorzaakt wordt. Daarom is dit signaal goed geschikt om de dissipatie van versterkers in realistische omstandigheden te meten en te voorspellen.

Een probleem van het IEC signaal is dat het moeilijk te genereren is in circuit simulatoren en in hardware. Hiervoor worden twee alternatieve testsignalen geïntroduceerd. Als eerste een simpele periodieke functie die dezelfde amplitudeverdeling heeft als het IEC signaal, en dus goed bruikbaar is in klasse G type versterkers. Als tweede een variant op het IEC signaal die dezelfde eigenschappen heeft als het IEC signaal, maar veel gemakkelijker te genereren is in simulatoren en in hardware.

(Hoofdstuk 3) Met een zinvol testsignaal is het nuttig bestaande versterkers met een hoog rendement en hun beperkingen onderzoeken. Er zijn grofweg twee soorten versterkers. Het eerste type zijn de lineaire versterkers (klasse G, klasse H, etc.). Ze maken hun uitgangsspanning op dezelfde manier als een klasse AB versterker: door een spanning over hun uitgangstransistoren te laten vallen. De verschillende klassen lineaire versterkers kunnen gegeneraliseerd worden tot slimme schakeltechnieken die ervoor zorgen dat de gemiddelde spanningsval over de uitgangstransistoren afneemt. Het belangrijkste nadeel van lineaire versterkers is dat voor een zeer lage gemiddelde dissipatie zeer complexe schakelconfiguraties nodig zijn, terwijl de maximum dissipatie nauwelijks minder wordt.

Het tweede type hoog rendementsversterkers zijn de schakelende versterkers. Het vermogensgedeelte van een schakelende versterker bestaat uit schakelaars die theoretisch niet dissiperen. Het door de schakelaars geproduceerde hoogfrequent pulsbreedte gemoduleerde signaal wordt door een verliesvrij LC filter gefilterd om het audiosignaal te reconstrueren. De belangrijkste beperkingen van schakelende versterkers zijn het niet integreerbare filter, het schakelresidu aan de uitgang en de invloed van de belasting op de vervorming en de frequentieoverdracht. Door het hogere orde LC filter zijn hoge terugkoppelingsfactoren niet mogelijk.

(Hoofdstuk 4) De combinatie van schakelende en lineaire versterkers is alleen gerealiseerd in systemen waarbij de schakelende versterker de voedingsspanning levert voor een lineaire versterker. Hierdoor wordt een goede controle over de luidspreker gecombineerd met een hoog rendement. Een echt hoog rendement kan echter niet gehaald worden, en de uitgangstransistoren moeten erg groot zijn omdat de twee versterkers in serie staan.

(Hoofdstuk 5) Een 'serie' topologie die geen grote uitgangstransistoren nodig heeft bestaat uit een lineaire en schakelende versterker in brug. Het common-mode niveau wordt op een dusdanige manier gestuurd dat de uitgangsspanning van de lineaire versterker altijd dicht bij één van de voedingsspanningen ligt. Hierdoor blijft de gemiddelde spanningsval over de uitgangstransistoren klein. Er moeten diverse afwegingen gemaakt worden betreffende de sturing van het common-mode niveau en de vermindering van de vervorming. De resultaten met een prototype van deze versterker laten zien dat de opzet goed functioneert. Het rendement laat nog te wensen over, maar er liggen voldoende mogelijkheden tot verbetering.

(Hoofdstuk 6) Een 'parallelle' topologie die geïntroduceerd wordt bestaat uit een schakelende versterker met een stroombronkarakter parallel aan een lineaire versterker. De lineaire versterker bepaalt de uitgangsspanning en draagt zorg voor een lage vervorming en een vlakke frequentieoverdracht. De meeste belastingsstroom wordt geleverd door de schakelende versterker, zodat de dissipatie laag is. Voor een goed werkend systeem moeten aspecten als vermogensbandbreedte, rustdissipatie, en de stabiliteit geanalyseerd worden. Een prototype van deze versterker geeft goede resultaten te zien, zoals een lage dissipatie, weinig externe componenten, weinig vervorming en een klein schakelresidu. Het belangrijkste nadeel is het vrij hoge ruststroomverbruik, maar verscheidene verbeterde topologieën lijken hiervoor een oplossing te kunnen bieden.

(Hoofdstuk 7) Hoog rendementsversterkers staan de laatste jaren opnieuw in de belangstelling, en de prototypes die hier gepresenteerd zijn passen goed in deze ontwikkeling. De specificaties kunnen zich meten aan die van versterkers die in de tijd van dit onderzoek elders ontwikkeld zijn. Snellere IC-processen en een verdere integratie van vermogenselektronica zullen ertoe bijdragen dat hoog rendementsversterkers in veel applicaties een echt alternatief kunnen worden voor klasse AB versterkers.

CONTROL LINEARITY AND JITTER OF RELAXATION OSCILLATORS

S.L.J. Gierkink
18 juni 1999
Promotor: prof.ir. A.J.M. van Tuijl

Het grootste deel van dit proefschrift komt voort uit de notie dat er in een bestaande klasse van oscillatoren, namelijk de relaxatie oscillator, ruimte is voor een aanzienlijke verbetering van de performantie door gebruik te maken van een alternatief en simpel werkingsprincipe (het verschilpaar) voor een essentiële functionaliteit (de detectie van het passeren van de threshold spanning door de capaciteitsspanning) zoals die in bestaande relaxatie oscillatoren wordt geïmplementeerd door gebruik te maken van een comparator.

Hoofdstuk 1 introduceert de relaxatie oscillator als zijnde een veel gebruikte, monolithisch integreerbare oscillator met een fundamenteel lineaire relatie tussen control-grootheid en oscillatie frequentie. De werking van de relaxatie oscillator is erop gebaseerd dat een capaciteit afwisselend wordt geladen en ontladen tussen twee threshold spanningen. Een detectie circuit (comparator) detecteert wanneer de capaciteitsspanning één van beide threshold niveaus passeert en "set" of "reset" dan een geheugenelement dat de stroomrichting omkeert. De oscillatie frequentie is regelbaar met de grootte van de stroom. Belangrijke kwaliteitscriteria voor relaxatie oscillatoren zijn de lineariteit van het regelkarakteristiek, de mate van frequentie stabiliteit (de mate van ontbreken hiervan wordt aangeduid met de termen "faseruis" of "jitter") en ook de temperatuursstabiliteit. Hoofdstuk 1 introduceert kort de mechanismen die van invloed zijn in de relaxatie oscillator op de genoemde kwaliteitscriteria. Sommige van deze mechanismen zijn verantwoordelijk voor een koppeling van kwaliteitscriteria waardoor trade-offs ontstaan in het ontwerp van praktische relaxatie oscillatoren. Er wordt kort ingegaan op de in hoofdstuk 4 te introduceren "gekoppelde zaagtand oscillator" en de verbeteringen die dit concept biedt ten aanzien van de control lineariteit en de jitter. Tot slot geeft hoofdstuk 1 nog een niet-volledig overzicht van enkele andere oscillator principes; dit om een idee te geven wat er nog meer "te koop" is.

Hoofdstuk 2 is het resultaat van een verdieping in de literatuur op het gebied van frequentie stabiliteit, en dan met name de kwantificering daarvan in zowel het tijd- als frequentie domein. In de circuit literatuur wordt de frequentie stabiliteit van oscillatoren vaak onderzocht en gespecificeerd in ofwel het tijddomein (jitter) ofwel

het frequentie domein (faseruis). In hoofdstuk 2 is met name gezocht naar de onderlinge verbanden tussen een aantal meer of minder gebruikte grootheden waarmee faseruis of jitter wordt gekarakteriseerd. Er wordt ingegaan op de specifieke problemen die opdoemen bij het gebruik van sommige tijddomein grootheden, in relatie tot specifieke faseruis spectra. Speciale aandacht gaat uit naar de theorie van de "structure functions" toegepast op de karakterisatie van frequentie stabiliteit in het tijddomein [6][7]. Vele van de tijddomein gerelateerde jitter-grootheden treden op als speciale gevallen van deze theorie. Voorst kunnen "structure functions" zonder problemen overweg met alle gangbare faseruis spectra, dit in tegenstelling tot meer conventionele jitter grootheden als de één-periode- jitter. En niet in de laatste plaats kunnen zij met voordeel worden toegepast bij de verwerking van tijddomein meetresultaten van oscillatoren, waarvan de oscillatie frequentie onderhevig is aan temperatuur-drift.

Hoofdstuk 3 bediscussieert enkele bestaande relaxatie oscillator topologieën. Bekend is dat de random-jitter in deze oscillatoren bepaald wordt door de tijdsonzekerheid die geintroduceerd wordt bij iedere passage van het threshold niveau door de capaciteitsspanning. Deze onzekerheid is het gevolg van ruis op zowel het threshold niveau als op de capaciteitsspanning (ten gevolge van de ruis op de laadstroom). Aangetoond wortd dat de ruis op het threshold niveau over het algemeen de dominante bijdrage levert aan de jitter. De oorzaak hiervan is dat de ruis op het threshold niveau over vrijwel de volledige bandbreedte bijdraagt aan de jitter, ten gevolge van de samplende actie zoals die verricht wordt door het circuit (de comparator) dat de passages van het threshold niveau detecteert. Dit in tegenstelling tot de ruis op de laadstroom, welke door de oscillator capaciteit in een gefilterde (bandbreedte begrensde) spanningsvariatie wordt omgezet. Men kan nu de tijdsonzekerheid in de periodiciteit van het oscillator signaal verkleinen door de helling te vergroten waarmee de capaciteitsspanning het threshold niveau passeert; dit kost echter in het algemeen extra stroom. Een andere mogelijkheid is het verkleinen van de bandbreedte (en dus de snelheid) van het circuit dat de passages van de threshold spanning detecteert. Het probleem van deze aanpak is dat een verkleining van de detectie bandbreedte een vergroting tot gevolg heeft van de tijdsdelay die dan bij iedere threshold passage wordt toevoegd aan de periodeduur. Dit verslechtert de lineariteit van de regelkarakteristiek van de oscillator, doordat de toegevoegde delay over het algemeen niet lineair afhankelijk is van de stroom door de capaciteit. Samenvattend leidt dit tot de conclusie dat er een "trade-off" bestaat in de relaxatie oscillator tussen een lage jitter en een hoge lineariteit in de regelkarakteristiek.

In hoofdstuk 4 wordt een alternatief en eenvoudig level-detectie mechanisme geïntroduceerd dat de trade-off tussen control lineariteit en jitter verwijdert. In de voorgestelde "gekoppelde zaagtand oscillator" wordt een eenvoudig verschilpaar gebruikt om de laadstroom van de capaciteit geleidelijk op te voeren tot zijn maximale waarde, op het moment dat de spanning over een tweede capaciteit de threshold spanning passeert. Gedurende de tijd dat het verschilpaar de laadstroom geleidelijk inschakelt wordt de ruis op het threshold niveau omgezet in een ruisstroom en meegeintegreerd (gefilterd) door de capaciteit. Ten gevolge van de specifieke combinatie van transconductantie en schakeltijd van het verschilpaar introduceert de ruis op het threshold niveau nu een random tijdfout die aanzienlijk kleiner is dan die, welke optreedt in een conventionele relaxatie oscillator, waar de laadstroom zo snel mogelijk volledig wordt ingeschakeld bij iedere passage van de threshold spanning. Hoe groter de schakeltijd van het verschilpaar wordt gekozen, hoe lager de bijdrage van de ruis op het threshold niveau aan de jitter is. Ondanks het geleidelijke inschakelen van de laadstroom van de capaciteit blijft de control lineariteit van de oscillator behouden, ten gevolge van de punt-symmetrische overdracht van spanning naar stroom van het verschilpaar. De control lineariteit wordt in principe alleen beperkt door mismatches in de transistoren.

Hoofdstuk 5 gaat in op het ontwerp van enkele praktische realisaties van de gekoppelde zaagtand oscillator. Er worden procedures gegeven voor het vinden van de waarden voor de threshold spanning in combinatie met andere referentie spanningen (noodzakelijk voor het definiëren van het ontlaadinterval van de capaciteiten) en de dimensionering van het verschilpaar die resulteren in een zo laag mogelijke jitter. De oscillator realisaties verschillen hoofdzakelijk in het aantal trappen dat wordt gebruikt bij de generatie van één periode van het oscillator signaal. Het minimum aantal trappen dat vereist is is twee. In dat geval is een additioneel geheugen nodig dat het laadtraject van de capaciteit veilig stelt. Een nadeel van de twee-traps gekoppelde zaagtand oscillator is dat de ontlaadtrajecten van de capaciteiten de duur van het schakelinterval van de verschilparen beperkt. Hierdoor is slechts een beperkte bandbreedte begrenzing mogelijk van de mate waarin de ruis op het threshold niveau bijdraagt aan de jitter. Aangetoond wordt dat de schakelintervallen van de verschilparen niet langer worden beperkt

door de ontlaadintervallen van de capaciteiten wanneer er vier of meer trappen worden gebruikt in de oscillator. Hierdoor is een grotere beperking mogelijk van de bijdrage van de ruis op het threshold niveau aan de jitter. De IC-realisatie van een vier-traps gekoppelde zaagtand oscillator wordt besproken en de meetresultaten van control lineariteit en jitter worden gegeven. Vergeleken met de theoretische performantie van een relaxatie oscillator die een comparator toepast om een threshold level passage te detecteren en die eenzelfde control lineariteit bezit vertoont de gekoppelde zaagtand oscillator een factor 9 verbetering in jitter. Hoofdstuk 5 wordt afgesloten met de behandeling van een schakeltechniek, welke gebruikt kan worden om de faseruis bijdrage van $1/f$ ruis te reduceren. De techniek maakt gebruik van de tijdcorrelatie van $1/f$ ruis om tijdfouten, gemaakt in achtereenvolgende trappen van de oscillator, te compenseren. Naast een reductie in faseruis leidt de techniek ook tot een factor twee power reductie in de oscillator.

Hoofdstuk 6 tenslotte is gewijd aan een curieus $1/f$ ruis fenomeen dat optreedt in geschakelde MOSFET transistoren en dat implicaties kan hebben voor het ontwerp van oscillatoren in CMOS technologie. Naar aanleiding van een studie van de faseruis in CMOS ringoscillatoren is gebleken dat de statistische eigenschappen van MOSFET $1/f$ ruis op een zeker moment sterk afhangen van de bias condities van de MOSFET transistor in het verleden. Specifieker: het is gebleken dat de intrinsieke $1/f$ ruis van een MOSFET transistor gedurende actieve fasen kan worden gereduceerd door de transistor periodiek uit te zetten. De bias condities van de transistor gedurende de uit-fase beïnvloeden de sterkte van de $1/f$ ruis gedurende de aan-fase van de transistor. Dit fenomeen is in 1991 voor het eerst gepubliceerd door de physici Bloom en Nemirovsky, maar is nooit doorgedrongen tot de circuit ontwerp literatuur. In hoofdtuk 6 worden verscheidene meetresultaten besproken die de effecten van dit fenomeen laten zien aan de hand van $1/f$ ruis spectra in basisband van schakelende MOSFET transistoren. Voorts wordt een klein numeriek experiment besproken welke $1/f$ ruis simuleert door middel van een superpositie van verscheidene zogenaamde "random telegraaf signalen". Aangetoond wordt dat deze random telegraaf signalen op eenvoudige wijze periodiek zijn te "resetten", resulterend in ruisspectra welke grote gelijkenis vertonen met de gemeten $1/f$ ruis spectra van geschakelde MOSFET transistoren. Het $1/f$ ruis reductie fenomeen is relevant voor de studie van faseruis in oscillatoren doordat het de mogelijkheid biedt tot het reduceren van de faseruis, zonder dat dit leidt tot een toename van de power consumptie. Sterker nog: in geval de oscillator- topologie een periodiek aan-en uitschakelen van de transitoren toelaat, dan kan deze mogelijkheid worden uitgebuit om een afname in zowel power consumptie als $1/f$ ruis geïnduceerde faseruis te behalen. In deze lijn der gedachten wordt de "switched-bias techniek" geïntroduceerd als een circuit techniek waarbij intentioneel aan- en uitschakelen van MOSFET transistoren wordt uitgebuit om hun intrinsieke $1/f$ ruis te reduceren. De techniek is experimenteel geïmplementeerd in een zes-traps gekoppelde zaagtand oscillator welke oscilleert op een frequentie van 120 kHz. De experimentele resultaten laten zien dat de switched-bias techniek voordeel biedt: het leidt niet alleen tot een reductie in power consumptie van ongeveer 30% maar ook in een 8dB reductie in $1/f$ ruis geïnduceerde faseruis. Hoofdstuk 6 sluit af met een verhandeling over de experimenten die gedaan zijn met betrekking tot een CMOS ring oscillator. Aangetoond wordt dat de gemeten $1/f$ ruis geïnduceerde faseruis van een CMOS ringoscillator dezelfde afhankelijkheid van de gate- source spanning in de uit-fase van de transistoren vertoont als de MOSFET $1/f$ ruis in basisband. De reductie van intrinsieke $1/f$ ruis zoals die optreedt in de transistoren van een CMOS ringoscillator resulteert in een lagere $1/f$ ruis geïnduceerde faseruis dan verwacht kan worden op basis van berekeningen.

Hoofdstuk 7 tenslotte geeft een samenvatting, somt de belangrijkste conclusies op, identificeert de orginele bijdragen en geeft tips voor vervolg onderzoek.

AN INTEGRATED SENSOR SYSTEM FOR MONITORING WASHING PROCESSES

G.R. Langereis
8 april 1999
Promotor: prof.dr.ir. P. Bergveld

Bij het wassen van kleding in een wasmachine spelen twee processen een rol. Ten eerste voert de elektronica in de machine een programma uit dat zorg draagt voor een fysische waswerking. Door de trommel te bewegen komt een beweging van het wasgoed en waswater tot stand resulterend in mechanisch wassen. Ook zorgt de machine voor het doorlopen van een temperatuur programma van het waswater. Ten tweede resulteert het toegevoegde waspoeder in een chemische waswerking. In het waspoeder bevinden zich wascomponenten die ieder aangrijpen op een specifiek soort vuil.

Omdat wassen een aanzienlijke hoeveelheid energie en water verbruikt, en tevens het milieu belast met de afvoer van het waswater, is reductie hiervan van groot belang. Hoewel zowel het wasprogramma als de hoeveelheid gedoseerd waspoeder enigszins stuurbaar is, is er tussen beide stuurmechanismen geen wisselwerking. Voor een efficiënte afname van verbruikte energie, water en waspoeder is het noodzakelijk dat er een intelligente samenwerking is tussen de dosering van waspoeder en het mechanisch wassen. Dit kan slechts tot stand komen door sensoren in een wasmachine te plaatsen die informatie over de chemie aan het elektronisch brein van de wasmachine kunnen geven.

In dit proefschrift wordt beschreven hoe een sensorsysteem is ontworpen, vervaardigd en getest waarmee een indruk van de toestand van het wasproces verkregen kan worden. Hierbij is een aantal technieken gebruikt om de sensoren in het systeem te combineren.

Ten eerste zijn de sensoren die in het systeem geïntegreerd zijn zo gekozen dat ze gemakkelijk tot één multifunctionele structuur konden leiden op basis van materiaalkeuze en vervaardigingswijze. Dit leidt tot een afname van het aantal aansluitdraden tot vier, en tevens tot een structuur die steeds op hetzelfde punt in het waswater meet.

Daarbij komt, dat samen met de sensoren, ook actuatoren geïntegreerd zijn. Hiermee kunnen chemische experimenten uitgevoerd worden waarbij opzettelijk de chemische samenstelling van het waswater lokaal verstoord wordt, terwijl de respons op deze verstoring gemeten wordt. Een dergelijke meting wordt een stimulus-respons meting genoemd en heeft als voordeel dat soms nieuwe parameters gemeten kunnen worden.

Tenslotte levert het combineren van alle verkregen sensor uitlezingen met de resultaten van de stimulus-respons metingen nieuwe gegevens op na intelligente bewerking.

Het uiteindelijke resultaat is een sensor systeem dat bestaat uit een kleine metalen structuur op een drager met een totaal oppervlak van slechts één bij één millimeter. Hiermee kunnen, na uitlezing met de juiste elektronica, onder andere de volgende wasparameters bepaald worden: temperatuur, bleekactiviteit, elektrische geleidbaarheid en beweging van het waswater en tevens de temperatuur afhankelijkheid van de elektrische geleidbaarheid. Deze laatste kan informatie opleveren over de afzonderlijke soorten geladen deeltjes in het waswater.

Voor de wasparameters die nog niet direkt te meten zijn met de ontwikkelde structuur, worden tenslotte aanbevelingen gegeven om het geïntegreerde sensor systeem uit te breiden.

THE ^{E}MOSFET

A POTENTIOMETRIC TRANSDUCER BASED ON CHEMICALLY INDUCED WORK FUNCTION CHANGES OF ELECTROCHEMICALLY ACTIVE FILMS

J. Hendrikse
22 oktober 1998
Promotor: prof.dr.ir. P. Bergveld

Dit proefschrift beschrijft een nieuw type transducent waarmee veranderingen in de werkfunctie van een elektrochemisch actieve film gemeten kunnen worden. Veranderingen in de werkfunctie van een materiaal kunnen bepaald worden wanneer het materiaal wordt gebruikt als het gate contact van een MOSFET. In dat geval wordt de verandering in werkfunctie vertaald in een verandering in drempelspanning van de MOSFET. Aangezien de werkfunctie van een elektrochemisch actieve film beïnvloed kan worden door de oplossing waar de film in ondergedompeld is, verschaft de drempelspanning van de MOSFET informatie over de oplossing. Dit type MOSFET-transducent vertaalt informatie uit het (elektro)chemische domein dus naar het elektrische domein.

Het transductieprincipe zelf is niet nieuw. Daarom worden in hoofdstuk 2 een aantal bestaande MOSFET-transducenten met elkaar vergeleken en wordt een indeling gemaakt aan de hand van de volgende drie criteria:

1. Het mechanisme waardoor de werkfunctie verandert
2. De fase van het monster (gas of vloeistof) waar de transducent voor wordt gebruikt
3. De positie van het monster, deze kan onderdeel zijn van de MOSFET, of kan de drempelspanning slechts zijdelings beïnvloeden.

Het onderwerp van dit proefschrift is een nieuwe MOSFET-transducent, de ^{E}MOSFET. Aan de hand van deze criteria kunnen de karakteristieke eigenschappen van de ^{E}MOSFET worden duidelijk gemaakt:

1. Het bulk deel van de werkfunctie verandert door gewone elektrochemische processen. Deze veranderingen kunnen dus worden beschreven met gewone elektrochemische modellen.
2. De ^{E}MOSFET is bedoeld om in waterige oplossingen te meten.
3. De oplossing beïnvloedt de drempelspanning indirect.

Hoe de werkfunctie van elektrochemisch actieve films kan worden beschreven met gewone elektrochemie wordt duidelijk gemaakt in hoofdstuk 3. Bestaande modellen die de elektrochemie van elektrochemisch actieve films beschrijven zijn hier niet toe in staat, dus was een nauwkeuriger beschrijving nodig. De beschrijving in hoofdstuk 3 is gebaseerd op de scheiding van de normale elektrodepotentiaal in twee delen, die allebei apart worden beschreven. Het eerste deel is het potentiaalverschil tussen de film en de oplossing, en het tweede deel is het potentiaalverschil tussen de film en het metaal dat gebruikt wordt om elektrisch contact met de film te maken.

In hoofdstuk 4 wordt de ^{E}MOSFET structuur in meer detail beschreven, en er wordt aangetoond dat de drempelspaning slechts afhangt van het tweede potentiaalverschil. Meetresultaten verkregen aan een MOSFET met een iridium oxide gate contact stemmem overeen met deze theorie.

In hoofdstuk 5 wordt de ontwikkelde theorie gebruikt hij het maken van een nieuw type zuurstof sensor. Naast de al ontwikkelde theorie, wordt een beschrijving van de elektrodepotentiaal tijdens potentiometrie bij constante stroom gegeven. De gepresenteerde metingen tonen aan dat de overpotentiaal die nodig is voor de reductie van zuurstof, de drempelspanning van de ^{E}MOSFET verandert.

In de hoofdstukken 6 en 7 wordt de ^{E}MOSFET gebruikt om elektrochemisch actieve films te karakteriseren. Polypyrrole wordt bestudeerd in hoofdstuk 6, en voor het eerst worden in situ metingen van de Donnan potentiaal als functie van de elektrodepotentiaal gepresenteerd. Tot nu toe waren zulke metingen alleen mogelijk aan films die uit de oplossing verwijderd waren. In hoofdstuk 7 wordt de drempelspanning bestudeerd terwijl een iridium oxide film wordt geoxideerd en gereduceerd door een opglelegde wisselspanning. De metingen in dit hoofdstuk laten zien dat de meting van de drempelspanning een welkome aanvulling biedt op normale wisselspanningsvoltammetrie metingen.

In hoofdstuk 8 worden voorlopige resultaten gepresenteerd, behaald met een polymeer waarin zich een enzym bevindt. Deze methode van immobilisatie van biomoleculen begint een standaard procedure te worden, en het gebruik van zulke polymeerfilms als MOSTET gate contact biedt een generieke transductie methode.

In hoofdstuk 9 worden de resultaten samengevat en wordt een aantal conclusies getrokken en worden aan-

bevelingen voor verder onderzoek gedaan.

DIRECT WAFER BONDING WITH CHEMICAL MECHANICAL POLISHING

APPLICATIONS IN SENSORS AND ACTUATORS

C. Gui
13 november 1998
Promotor: prof.dr. M.C. Elwenspoek

Dit proefschrift beschrijft het direct-waferbondingproces van ruwe oppervlakken van siliciumgerelateerde materialen en de behandeling van deze oppervlakken met behulp van chemisch-mechanisch polijsten, alsmede toepassingen van deze technieken in een aantal sensoren en aktuatoren.

Hoofdstuk 1 biedt een historisch overzicht van de theoretische ontwikkelingen op het gebied van de studie aan kontakt en adhesie tussen vaste stoffen en de invloed van oppervlaktebewerkingstechnieken hierop. De ontwikkeling van de directwaferbondingtechnologie en haar toepassing in sensoren en aktuatoren worden beknopt samengevat. Uit deze beschouwing worden de doelstellingen van het proefschrift afgeleid.

In hoofdstuk 2 wordt een overzicht van de huidige en toekomstige rol van chemisch-mechanisch polijsten ten behoeve van direct-waferbonding gepresenteerd. De zware eisen die bij direct-waferbonding gesteld worden aan de oppervlaktegladheid en de mate waarin chemisch-mechanisch polijsten hieraan kan voldoen worden kort beschreven. De verschillende chemisch-mechanische polijstprocessen die ontwikkeld zijn ten behoeve van waferbonding worden besproken. Tot slot worden de toepassingen van de combinatie van chemischmechanisch polijsten en waferbonding bij de fabricage van nieuwe sensoren en aktuatoren samengevat.

Een statistische studie van het chemische-mechanische polijstproces voor éénkristallijne {100}-georiënteerde siliciumwafers wordt beschreven in hoofdstuk 3. Dit proces wordt gekarakteriseerd aan de hand van een zogenaamde "surface response" methode, waarbij o.a. wordt gekeken naar de materiaalverwijderingssnelheid, de uniformiteit hiervan, het afronden van patroonkanten en nog een aantal andere relevante grootheden. De rol van procesparameters als druk, tafelrotatiesnelheid, slurrytoevoersnelheid, temperatuur, etc. is bestudeerd met de nadruk op de interactie tussen deze parameters.

Hoofdstuk 4 beschrijft een theoretische zoektocht naar een criterium voor de oppervlaktegladheid die nodig is voor direct-waferbonding. Deze beschouwing is gebaseerd op de kontaktmechanica van oppervlakken, waarbij een statistisch model van de oppervlaktetopografie wordt gebruikt. De effectieve bindingsenergie en het werkelijke kontaktoppervlak tijdens waferbonding worden afgeleid als funktie van een bepaalde oppervlakteadhesieparameter. Onderwerpen gerelateerd aan de mechanische spanning en de vervorming van het in verbinding gebrachte scheidingsvlak worden eveneens besproken.

In hoofdstuk 5 wordt een experimentele studie van direct-waferbonding van ruwe oppervlakken voor en na behandeling met chemisch-mechanisch polijsten gepresenteerd. Direct-waferbonding en chemisch-mechanisch polijsten worden toegepast op siliciumgerelateerde materialen, zoals éénkristallijn silicium na KOH etsen, éénkristallijn silicium na een zware boordiffusiestap, polykristallijne silicium en silicium-rijke siliciumnitride films, beide aangebracht met lage druk chemical vapor deposition (LPCVD).

Een nieuwe methode voor de fabricage van multilaagsubstraten ten behoeve van beweegbare mikrostrukturen wordt geïntroduceerd in hoofdstuk 6. Eénkristallijne mikrostrukturen worden vervaardigd uit deze Si-SiO_2-PolySi-SiO_2-Si-substraten, waarbij de poly-siliciumlaag dient als opofferingslaag. Direct bonding tussen de polysiliciumlaag en een thermische oxidelaag wordt mogelijk gemaakt door middel van de chemisch-mechanische polijsttechniek.

Direct bonding van wafers bedekt met een dikke (tot 1200 nm) LPCVD siliciumrijke siliciumnitridelaag is mogelijk na een chemisch-mechanische polijststap, zoals wordt aangetoond in hoofdstuk 7. Het benodigde polijstproces wordt experimenteel gekarakteriseerd en in detail besproken. De binding tussen twee wafers bedekt met siliciumnitride, met en zonder dipping in een HF-oplossing, en tussen een siliciumwafer met en een wafer zonder nitridebedekking is onderzocht. Het mechanisme van direct bonding op siliciumnitride wordt besproken.

In hoofdstuk 8 wordt een hoge-Tc-supergeleiderbolometer gepresenteerd, die gebaseerd is op een siliciumnitridemembraan. Er is een fabricageproces voor de benodigde silicium-op-nitride-substraten ontwikkeld; dit proces, alsmede het aanbrengen van de supergeleiderstruktuur, wordt beschreven, en de verkregen bolometer wordt gekarakteriseerd.

Een nieuwe methode voor het maken van geïntegreerde optische nanomechanische devices

wordt gedemonstreerd in hoofdstuk 9. De ontwerpoverwegingen voor een geïntegreerde optische aan/uit-schakelaar, gebaseerd op een intensiteitsabsorptiemechanisme worden gepresenteerd. In het ontwerp wordt gebruik gemaakt van het polijsten van PECVD-siliciumdioxide films en waferbonding met uitlijning. De fabricage wordt beschreven en enkele meetresultaten worden getoond. Het stiktieprobleem, dat optreedt bij de fabricage van de devices, wordt besproken en een methode om stiktie te elimineren wordt geïntroduceerd.

Tot besluit worden in hoofdstuk 10 de algemene conclusies van deze dissertatie alsmede enkele suggesties voor toekomstig onderzoek gepresenteerd.

SPIN-ON-GLASS MATERIALS AND APPLICATIONS IN ADVANCED IC-TECHNOLOGIES

Nguyen Nhu Toan
26 februari 1999
Promotors: prof.dr. P.H. Woerlee
prof.dr. Nguyen Duc Chien

This thesis deals with the study of shallow PN junction formation by dopant diffusion from Spin-On Glass (SOG) for future deep sub-micron BiCMOS technology. With the advantages of no transient enhanced diffusion and no metal contamination, diffusion from highly doped SOG (also called spin-on dopant - SOD) is a good technology for shallow junction formation. In this thesis, diffusion of impurities from SOD into Si and polysilicon on silicon structure has been studied. This shallow junction formation technique using SOD has been applied in realisation of two important devices, i.e. high frequency bipolar transistor and deep sub-micron elevated source/drain MOSFET.

In chapter 2, realization and characterization of the SOG materials are described. Good undoped SOG and SOD (phosphorus doped) materials and layers with similar properties as commercial ones have been obtained. Using the design of experiment method, effects of several factors in the sol-gel reaction, e.g. water volume, TEOS volume, acid concentration and reaction time, were investigated. The results showed that the water volume had the largest effect on the thickness, the shrinkage and the surface roughness of obtained SOG layers. In addition, dilution of the obtained SOG sols at the end of the sol-gel reactions with a solvent, e.g. acetone or ethanol, can increase the lifetime of the sols and improve significantly the properties of the coating layers. Elements in SOD layers and their concentrations profiles have been explored by advanced analyse techniques, e.g. XPS and AES. The evolution of the SOD layer properties during baking and annealing steps was investigated.

In chapter 3, diffusion of boron and phosphorus from SOD into Si and polysilicon on Si structure was investigated using both conventional furnace and rapid thermal processing. The influence of the thermal budget to the electrical properties of the shallow junctions were investigated using diode structures. Rapid thermal diffusion of SOD resulted in very shallow junctions in Si, i.e. less than 20 nm. Diffusion using conventional furnace resulted in deeper junctions due to the large thermal budget.

The shallow junction formation using polysilicon/Si structures has the advantage of lower sheet resistance and elevated contacts in comparison with the conventional Si junction. Very high quality shallow junctions were obtained with this structure using both furnace and rapid thermal diffusion. Furnace diffusion resulted in better quality diodes than rapid thermal diffusion because the rapid thermal process created stress-induced defects in the PN junctions. In this diffusion technique, the diffusion of impurities from SOD into polysilicon/Si is very dependent on the micro-structure of the as-deposited layer, i.e. polysilicon or amorphous silicon. The random structure of as-deposited amorphous layers caused slower diffusion for both boron and phosphorus compared to the as-deposited polysilicon layer with columnar structure. Therefore, a higher thermal budget was required to form a good shallow junction using as-deposited amorphous silicon.

In both cases of dopant diffusion from SOD into Si and polysilicon/Si, a 50 nm junction depth in the Si substrate was the lower limit for a good quality shallow PN junction.

The SOD diffusion into polysilicon/Si technique was then applied to shallow junction formation for polysilicon-emitter in high frequency bipolar transistors and for elevated source/drain MOSFETs in chapter 4 and 5 respectively.

In chapter 4, the UT-BiCMOS bipolar transistor process was optimised for very high energy collector implantation and high frequency response. Three different process variants were generated and realized. The first variant was proposed to keep the standard UT-BiCMOS process from changes and used P^{3+} ions at 450 kV for collector implantation. However, it was still very difficult to obtain P^{3+} ions and the implanter breakdown problem was not solved completely. The second variant

was designed to use advanced rapid thermal annealing technique for higher frequency response, i.e. more than 10 GHz. In this variant, the collectors were implanted with P^{2+} at 500 kV and there was no breakdown problem. Better devices were obtained for this variant with higher yield compared to variant 1. Variant 3 with a SOD source for doping the poly-emitter showed the best results. The process flow of this variant was almost the same as in variant 2 except for the emitter doping step. However, all of the devices had better electrical characteristics than variant 1 and 2 showing the advantage of the diffusion process from SOD sources.

In chapter 5, a new concept of poly-spacers was proposed for future sub-0.1 μm MOSFET. This device has the elevated source/drain structure and low series resistance which is very important to obtain a high drive current. Furthermore, the technology is straightforward and reproducible. As a vehicle to test the concept, poly-spacer 0.25 μm PMOS transistors were designed and realized using SOD diffusion source or BF_2 implantation. The photoresist ashing technique was investigated using a O_2 plasma for submicron gate length formation.

Several variants using both conventional furnace and rapid thermal processing were carried out. PMOS transistors with 8 nm gate oxide and gate lengths of 0.1 μm to 1 μm have been realised. All the PMOS transistors fabricated by SOD showed good electrical characteristics. The best working PMOS transistor had an effective gate length of 0.19 μm, a threshold voltage of approximately -0.67 V and -0.70 V for furnace diffusion and rapid thermal diffusion of SOD respectively, a subthreshold swing of 95 mV/decade and a current drive of about 160 μA/μm at a supply voltage of -2.5 V.

Although the device was not optimised yet, its electrical characteristics were very good and comparable with state-of-the-art devices. Above all, the new poly-spacer concept has been proven to be effective for future MOSFETs.

COMPUTER AIDED ANALYSIS OF SPINAL CORD STIMULATION

W.A. Wesselink
24 september 1998
Promotor: prof.dr. H.B.K. Boom

Sinds 1967 wordt ruggenmergstimulatie toegepast ter bestrijding van sommige vormen van chronische pijn. De theoretische basis voor deze therapie is het 'gare control' principe over pijnmechanismen, dat beschrijft hoe pijnbanen elektrisch geblokkeerd kunnen worden. Blokkering van de pijnbanen gaat gepaard met een licht tintelend gevoel (paresthesie) dat door de patiënt wordt ervaren in de overeenkomstige huidgebieden. Elektrische stimulatie van het ruggenmerg vindt gewoonlijk plaats middels een elektrode aan de achterzijde van het ruggenmerg die verbonden is met een geïmplanteerde pulsgenerator. Behalve ter bestrijding van chronische pijn wordt ruggenmergstimulatie ook toegepast bij slechte doorbloeding van de ledematen en bij angina pectoris.

Hoewel de technologie van ruggenmergstimulatie sinds de introductie sterk is verbeterd, is in grofweg de helft van de behandelingen het therapeutisch effect onvoldoende. Dit, als mede de onbekendheid van de biofysische mechanismen van ruggenmergstimulatie, heeft geleid tot de ontwikkeling van een computermodel waarmee de directe effecten van ruggenmergstimulatie gesimuleerd kunnen worden.

In dit proefschrift wordt beschreven hoe het computermodel gebruikt kan worden om een beter inzicht te krijgen in de mechanismen van ruggenmergstimulatie en hoe de therapie verbeterd kan worden. Het blijkt dat de mate van succes sterk afhangt van de plaats van de elektrode ten opzichte van het ruggenmerg. Middels juiste positionering en verbeterde elektroden wordt het mogelijk om selectiever de gewenste zenuwbanen in het ruggenmerg te stimuleren zonder dat er ongewenste effecten optreden. De simulaties hebben dan ook geleid tot nieuwe typen stimulatie-elektroden die naar verwachting tot een beter therapeutisch resultaat zullen leiden.

In hoofdstuk 2 is beschreven hoe met het computermodel stroom, stroomdichtheid, lading per puls en ladingsdichtheid per puls worden berekend zoals die optreden bij ruggenmergstimulatie. Het blijkt dat lading en ladingsdichtheid per puls in het ruggenmerg sterk worden beïnvloed door de duur van de stimulatiepuls, terwijl deze parameters in het weefsel vlak voor

de elektrode sterk bepaald worden door zowel de duur van de puls als de grootte van het contactoppervlak van de elektrode.

In hoofdstuk 3 is het computermodel gebruikt voor het berekenen van diameters van zenuwvezels aan de rand van de achterstrengen. Als input voor het model zijn stimulatiegegevens en CT-scans van patiënten gebruikt. Het blijkt dat de dikste vezels in het laterale deel van de achterstrengen significant groter zijn dan in het mediale deel. Met deze informatie is het mogelijk nauwkeuriger het effect van bepaalde elektrodeconfiguraties te berekenen.

Een deel van het computermodel voor ruggenmergstimulatie beschrijft het elektrische gedrag van zenuwvezels in het ruggenmerg bij stimulatie. In hoofdstuk 4 wordt een vezelmodel geïntroduceerd dat in tegenstelling tot eerder gebruikte modellen gebaseerd is op elektrofysiologische en morfometrische gegevens omtrent menselijke zenuwvezels. Het gedrag van dit vezelmodel correspondeert daarom beter met het gedrag van menselijke zenuwvezels gedurende ruggenmergstimulatie.

Tenslotte wordt in hoofdstuk 5 een kwantitatieve analyse gepresenteerd van de klinische prestaties van een nieuw elektrodeconcept ontworpen op basis van computersimulaties: de transversale tripolaire elektrode. De testresultaten van deze elektrode bij 30 patiënten uit een vijftal klinieken in Nederland, België en Canada zijn verzameld in een database, die tevens een digitale grafische representatie van het menselijk lichaam bevat om de topografie van zowel pijn als paresthesie vast te leggen. De resultaten laten zien dat de elektrode zich gedraagt zoals werd verwacht op grond van de simulaties met het computermodel. Conclusie uit deze klinische studie is dat de transversale tripool een aanzienlijke verbetering inhoudt ten opzichte van de huidige generatie ruggenmergstimulatie elektroden.

OBLIQUE SPUTTERED AND EVAPORATED MAGNETIC THIN FILMS FOR TAPE

M.D. Bijker
2 oktober 1998
Promotor: prof.dr.Th. J.A. Popma

Nadat in het eerste hoofdstuk enige aspecten van tape recording zijn belicht, wordt in het tweede hoofdstuk het magnetron-ondersteunde sputterdepositieproces beschreven. Het blijkt dat door een combinatie van magnetische en elektrische velden voornamelijk secundaire elektronen aan het target gebonden kunnen worden. Er is een vergelijking gemaakt van de kinetische energie die met deze groefelektronen geassocieerd kan worden in het geval er wel of geen magnetisch target wordt gebruikt. In tegenstelling tot de waargenomen situatie laten de berekeningen zien dat in het geval er een magnetisch target wordt gebruikt, de kinetische energie van de groefelektronen te klein is om het argongas te ioniseren. Daarom wordt de mogelijkheid geopperd dat de elektronen zich collectief gedragen, wat gepaard zou moeten gaan met een toename van de driftsnelheid. Dit in tegenstelling tot de deeltjesbenadering welke gekozen werd bij het berekenen van diezelfde driftsnelheid. Nadat de metingen van de stroomsterkte van de groefelektronen zijn besproken, laten metingen van de lokale gastemperatuur van het argongas, vlak onder de kathode, een temperatuur van rond de 330 K zien. Voorts is aangetoond dat de botsingskans tussen een gesputterd deeltje en de neutrale argondeeltjes voornamelijk afhangt van de druk van het argongas. Botsingen met enerzijds argon-ionen en anderzijds elektronen sorteren weinig effect op de richting en de energie van de gesputterde deeltjes. Uit een zogenaamde TRIM-simulatie blijkt dat deeltjes die onder een grote hoek met de target-normaal worden gesputterd, meer energie hebben dan deeltjes die in dezelfde richting van de normaal worden gelanceerd. Ook blijkt de spreiding in energie van deze hoger energetische deeltjes groter te zijn.

In het derde hoofdstuk wordt in het kort de schuine (oblique) groei van gesputterde dunne films beschreven. In tegenstelling tot het opdampproces zijn er bij het sputteren meer complicerende factoren die een volledige beschrijving van de onderliggende processen in de weg staan. Tijdens het sputteren komen argonatomen gemiddeld 10.000 maal vaker in aanraking met het oppervlak van de groeiende film dan een gesputterd atoom. Verder is het aannemelijk dat de aanwezigheid van hoog energetische argonneutralen de filmgroei zal beïnvloeden. In het geval van het sputterproces blijkt het niet eenvoudig te zijn om de energie- en hoekverdeling te berekenen, dit in tegenstelling tot het opdampproces. Dientengevolge is een commercieel simulatiepakket aangewend om de schuine filmmorfologie te simuleren. Alhoewel er zich een trend aftekent in de simulatie resultaten, zijn nog niet alle factoren die uiteindelijk de kolomhoek bepalen volledig begrepen.

Nadat in hoofdstuk vier de depositie- en analyseapparatuur is besproken waarmee het hier gepresenteerde onderzoek is verricht, worden in hoofdstuk vijf de experimentele resultaten van de opgedampte tapes beschreven. De experimentele tapes worden vergeleken

met een commerciële Hi8ME tape met betrekking tot hun microstructuur en hun magnetische en recordingeigenschappen. Uit deze vergelijking kan worden geconcludeerd dat, alhoewel er in het experimentele opdampproces tapes kunnen worden vervaardigd met sterk uiteenlopende eigenschappen, het (vooralsnog) niet mogelijk lijkt de eigenschappen die de Hi8ME tape karakteriseren in een experimentele tape te verenigen. Het is echter a priori niet duidelijk of een dergelijke tape m.b.v. het experimentele proces gemaakt kan worden. Dit lijkt sterk af te hangen van de manier waarop het zuurstof wordt aangeboden tijdens het proces. Alhoewel de experimentele tapes een vergelijkbare morfologie laten zien, zijn de kristallen in het bovenste gedeelte van de tape duidelijk groter dan die van de Hi8ME tape. Voorts is gebleken dat in alle tapes de geoxideerde en niet-geoxideerde deeltjes antiferromagnetisch gekoppeld zijn. Tezamen met de microstructurele onderzoekingen levert dit een structuurmodel op dat ook consistent lijkt met verdere metingen (zie de discussieparagraaf van hoofdstuk vijf). Als van een ferromagnetische CoNi korrel een diffusie-gelimiteerd oxidatiemodel mag worden verondersteld, kan het aannemelijk worden gemaakt dat de incorporatie van het zuurstof tijdens het proces erg inefficiënt lijkt te verlopen conform secties 5.3.4.2 en 5.3.4.4.

Gezien het lokale zuurstofdrukprofiel en de botsingsfrequentie van het zuurstofgas kan worden beredeneerd dat het inderdaad mogelijk is dat de initiële kolomhoek door het zuurstofgas kan worden gevarieerd. Verder lijkt het aannemelijk dat de kobalt atomen die arriveren aan de kant waar het zuurstof wordt ingelaten, worden verstrooid door de hoge druk van het zuurstofgas aldaar. Vanuit berekeningen met betrekking tot de tijd dat de groeiende film blootstaat aan het zuurstofgas en de drumtemperatuur, wordt het plausibel gemaakt dat de oxide huidjes in het geval van de commerciële Hi8ME tape dunner en meer uniform zijn.

Tenslotte worden in hoofdstuk zes de experimentele resultaten van de gesputterde lagen beschreven. Het eerste deel van dit hoofdstuk houdt zich bezig met de beschrijving van de experimenten onder een vaste hoek waar de invloed van een aantal fundamentele depositie parameters wordt bestudeerd. Daarna wordt de invloed van de depositiegeometrie, het targetmateriaal, de argondruk en het depositievermogen op de resulterende microstructuur geanalyseerd. Het blijkt dat de effectieve hoek tezamen met de argondruk een prominente rol speelt in de totstandkoming van de magnetische eigenschappen in relatie tot de microstructuur. Verder kon in geen enkele dunne film een duidelijke textuur worden vastgesteld. Tevens is gebleken dat in bijna alle gevallen de magnetische voorkeursrichting parallel is aan de kolomrichting. De uitzondering hierop wordt gevormd door het sample dat bij een hoge argondruk werd vervaardigd. Daarnaast is het waarschijnlijk dat de vorm-anisotropie van de kolomstructuur de belangrijkste bijdrage levert aan de anisotropiebalans. In het tweede gedeelte van hoofdstuk zes worden de voorlopige experimentele resultaten van de schuin gesputterde tapes vermeld. Er is aangetoond dat op een manier een tape met redelijke recording eigenschappen kon worden gereproduceerd. Deze tape laat in vergelijking tot een commerciële MP-pro tape identieke resultaten zien met betrekking tot de output versus frequentiekarakteristiek. Met behulp van TEM opnames is een schuine kolomvormige structuur aangetoond, waar vanuit de richtingsafhankelijkheid van de recording metingen al op was geanticipeerd. Tenslotte zijn de experimenten onder een vaste hoek gedaan op glas (eerste gedeelte van dit hoofdstuk) en op PET (tweede deel) met betrekking tot een aantal microstructurele en magnetische eigenschappen met elkaar vergeleken. Deze eigenschappen zijn tevens vergeleken met dezelfde commerciële Hi8ME tape uit het vijfde hoofdstuk.

BENT-WAVEGUIDE DEVICES AND MECHANO-OPTICAL SWITCHES

G.J. Veldhuis
17 december 1998
Promotor: prof.dr.Th. J.A. Popma

Voorwoord Het werk dat in dit proefschrift wordt beschreven, had het volgende doel: het onderzoeken van de theoretische en technologische haalbaarheid van nieuwe geïntegreerd optische device-concepten, die kunnen worden toegepast in evanescente-veld refractieve chemische sensoren.

Hoofdstuk 1: Introductie Geïntegreerde refractieve chemo-optische evanescente-veld sensoren vormen een interessant en veelbelovende onderzoeksgebied. Met name intensiteitgemoduleerde sensoren die een hoog- of laagdoorlaatrespons vertonen ten gevolge van een verandering in het reële deel van de brekingsindex van een te bemeten materiaal of een chemo-optische transductielaag, zijn bijzonder interessant. De inherente eenvoud van de benodigde hardware en signaalbewerking maken deze sensoren bijvoorbeeld aantrekkelijk

voor toepassing in procescontrole. Analoge toepassingen van deze sensoren vereisen vermogensreferentie. Met behulp van een nieuw, op geïntegreerde optica gebaseerd, referentieschema, kan dit op een handige manier worden uitgevoerd. Het referentieschema combineert tijddomeinmultiplexen met ruimtelijke scheiding en vereist geïntegreerd optische aan/uit intensiteitmodulatoren die een hoge uitdoving vertonen en technologisch compatibel zijn met de sensor zelf.

Hoofdstuk 2: Gevoeligheidsoptimalisatie voor evanescente-veld sensoren De optimalisatie van de gevoeligheid van alle mogelijke refractieve evanescenteveldsensoren die gebaseerd zijn op een drielaags slabgolfgeleider, is eens en voor altijd uitgevoerd door middel van een genormaliseerde analyse. De resulterende analytische uitdrukkingen en universele grafieken geven voor beide polarisaties de voorwaarden voor het verkrijgen van de maximale gevoeligheid voor hetzij een sensor waar de te meten grootheid homogeen is verdeeld over de halfoneindige golfgeleidercladding, hetzij een sensor waar dit een ultradunne film aan de golfgeleider-cladding overgang is.

Hoofdstuk 3: Gevoeligheidsvergroting in evanescente-veld sensoren Gevoeligheidsberekeningen aan een drielaags slabgolfgeleider laten een verrassend resultaat zien: de gevoeligheid van de effectieve brekingsindex voor een verandering van de claddingindex kan, voor TM-polarisatie en sterke geleiding, groter zijn dan die van een vrij bundel. Dit betekent dat de demping van een geleide golf, die zich voortplant in een golfgeleider omsloten door een absorberend medium, groter kan worden gemaakt dan die van een vrije bundel die zich in dat zelfde medium voortplant. Als een praktische toepassing van dit onverwachte fenomeen, wordt een, op een vrij hangende siliciumslabgolfgeleider gebaseerde, absorptiesensor voorgesteld, waarvan de gevoeligheid is vergroot met een factor 1.35.

Hoofdstuk 4: Spiraalrefractometer Een nieuwe geïntegreerd-optische refractometer waarvan de werking is gebaseerd op verandering in de bochtverliezen van een kanaalgolfgeleider, wordt voorgesteld en gedemonstreerd. De sensor is gefabriceerd in Si_3N_4/SiO_2-technologie en bestaat uit een spiraalvormige golfgeleider. Door deze vorm worden de verandering in de bochtverliezen vertaald naar een ruimtelijke coördinaat die kan worden uitgelezen door middel van een CCD-array. De experimenteel bepaalde prestaties en Het experimenteel bepaalde gedrag van de sensor komt goed overeen met theoretische voorspellingen op basis van een simpel model voor Whispering Gallery Modes. De minimaal detecteerbare brekingsindex verandering is experimenteel bepaald op $\Delta n = 1.3 \times 10^{-5}$. Dit resultaat illustreert op overtuigende wijze de haalbaarheid en relevantie van dit nieuwe sensorprincipe.

Hoofdstuk 5: Refractometer met vaste bochtstraal Een refractometer gebaseerd op het meten van de transmissie van een gebogen kanaalgolfgeleider wordt gerapporteerd. De sensor laat een hoogdoorlaat responskarakteristiek zien, hetgeen zeer interessant is voor digitale of analoge toepassingen in bijvoorbeeld procescontrole. Een genormaliseerde analyse van de bochtgevoeligheid wordt beschreven en een op dit mechanisme gebaseerde sensor is ontworpen in SiON-technologie. De sensor bevat drie nieuwe kanaalgolfgeleidergeometrieën. De sensorgolfgeleider zorgt ervoor dat de transmissie sterk afhangt van de brekingsindex van het cladding materiaal en kan worden ontworpen voor elk brekingsindexbereik tussen $1.00 < n < 2.00$. Daarnaast wordt het fabricageproces sterk vereenvoudigd door het toepassen van input en outputgolfgeleiders die technologisch gematched zijn aan de sensorgolfgeleider. Hierdoor worden kritische uitrichtstappen tijdens de fabricage voorkomen. Voorlopige metingen aan de sensor laten een maximale detectieresolutie van $\Delta n = 1 \times 10^{-5}$ rond een werkpunt van $n = 1.37$ zien, terwijl het meetbereik zich uitstrekt tussen $1.369 < n < 1.371$.

Hoofdstuk 6: Mechano-optische aan/uit schakelaar Een geïntegreerde mechano-optische golfgeleider wordt beschreven, waarbij een absorberend element met een hoge brekingsindex in en uit het evanescente veld van de geleide mode wordt bewogen teneinde een schakelwerking te bereiken. Voor de elektrostatisch aangedreven schakelaar is een uitdoving van 65 dB bij een actuatievoltage van 2.5 V bereikt. De schakelaar is 9.5 mm lang en de gebruikte golflengte is 632.8 nm. De voor de schakelaar berekende fundamentele resonantiefrequentie is 1.95 kHz. Het ontwerp maakt het mogelijk om in de toekomst de schakelaar luchtdicht te verzegelen, waardoor de squeeze-demping kan worden voorkomen die in de huidige schakelaar de responstijd tot 10 s beperkt. Fabricage op waferschaal wordt mogelijk gemaakt door het gebruik van standaard siliciumtechnologie, chemisch-mechanisch polijsten en aligned-waferbonding. Omdat de schakelaars net als de meeste evanescente-veld sensoren zijn gebaseerd op hoogcontrast golfgeleiders, zijn ze bij uitstek geschikt om te worden toegepast als kanaalselector in

geïntegreerd-optische sensorarrays.

Hoofdstuk 7: Thermo-optische intensiteitmodulator Een nieuwe geïntegreerd-optische intensiteitmodulator wordt voorgesteld en een eerste theoretische evaluatie van de belangrijkste device-eigenschappen wordt gepresenteerd. Het device-principe is gebaseerd op het beïnvloeden van de bochtverliezen in een golfgeleider door het zijdelingse brekingsindexcontrast dat de golfgeleider definieert te beïnvloeden. Als een proof-of-principle wordt een thermo-optisch geactueerde modulator gedemonstreerd. De modulator is gefabriceerd in een gecombineerde polymeer/SiON-technologie en vertoont een uitdoving van 23 dB voor een acuatie-energie van 1.5 W bij een golflengte van 1.55 μm. De verkregen resultaten suggereren dat deze modulatoren toepasbaar zijn als compacte shutters in $N \times M$ matrixschakelaars.

CoCrTa THIN FILMS FOR MAGNETIC RECORDING MEDIA

Phan Le Kim
15 april 1999
Promotors: prof.dr.Th. J.A. Popma
prof.dr. Than Duc Hien

This thesis has been devoted to deposition process, structures, magnetic properties and time-dependence effect of CoCrTa magnetic thin films for recording media. The experimental study began from Chapter 5 by investigating properties of single layer CoCrTa thin films, produced under different sputtering conditions. Next, in Chapter 6, structure of Cr single layer has been studied separately, in order to find a key to control the crystallography of this layer. After that, the CoCrTa layer was deposited onto the Cr underlayer, to form a configuration of typical longitudinal recording media. The dependence of various properties of CoCrTa/Cr media samples on thickness of each constituent layer has been investigated. In the second half of the thesis, which was presented in Chapter 7, we concentrated on the time-dependence effect in CoCrTa media samples, as both longitudinal (in-plane) and perpendicular media. The field dependence of viscosity, which belongs to the time-dependence effect, was the main subject of this study. In addition to CoCrTa media, we also studied perpendicular alumite media because this type of media is considered a good model to study various magnetic behaviors of recording media.

Chapter 5 reported the study of CoCrTa single layer thin films having c-axes perpendicular to the film plane, grown on Si substrate, under various sputtering conditions. An aim of the studies is to prepare knowledge for further studies of CoCrTa/Cr thin films in Chapter 6.

First of all, Ar pressure was varied. We found that in all examined films at different PAr's and at RT, the (0002) texture is dominant. The sample produced at 2×10^{-2} mbar was found to have the strongest (0002) texture. Measurements of film compositions showed that when PAr increases, the Cr content increases, the Ta content decreases and the Co content is almost unchanged. Besides, we found that Ar atoms are entrapped inside the films and the Ar content decreases with increasing PAr. Concerning the crystallographic spacings, it was observed that both (0002) and $(10\bar{1}0)$ spacings contract when PAr increases, which is associated with the decrease in the Ta and Ar contents in the films. Both in-plane and perpendicular coercivities increase slightly with PAr. Saturation magnetization decreases with increasing PAr, which is proven to be caused by the decrease in the film density.

In the second series of samples, we varied Ar pressure while setting substrate temperature T_s at 150^oC. We found that the optimum PAr in this case is about 3×10^{-2} mbar, instead of 2×10^{-2} mbar in the case at room temperature.

The second parameter to be varied was the substrate temperature T_s. It was found that the optimum T_s to obtain good (0002) texture is about 150^oC. From the depth profiles of the composition, we found that the samples are oxidized from the surface to a depth of about 5-10 nm. Co seems to accumulate to the surface to form Co oxide. The interface region between the film and the substrate, where Co, Cr and Ta diffuse into the Si substrate, extends as T_s increases. Regarding magnetic properties, we found that the perpendicular coercivity increases drastically with T_s and becomes saturated at T_s higher than 200^oC. The ratio $\mathrm{H}_{c\perp}/\mathrm{H}_{c\|}$ and the first anisotropy constant, characterizing the perpendicular anisotropy, get maximum at 150^oC. From the studies in this section, it could be concluded that 150^oC is the optimum substrate temperature.

The second part of the chapter presented some studies of CoCrTa films of various thicknesses. By making several films of different thicknesses and comparing the in-plane hysteresis loops, we estimated that the initial layer in our films has a thickness of about 20 nm.

The last part of the chapter dealt with the influences of CoCrTa alloy composition on the properties of CoCrTa films. Magnetic and structural properties

of perpendicular media samples made of two different compositions ($Co_{86}Cr_{12}Ta_2$ and $Co_{82}Cr_{13}Ta_5$) deposited on Si substrates and at different substrate temperatures from room temperature to 250^oC have been studied and interpreted. It was found that perpendicular H_c of the two compositions reaches maximum at T_s of about 200^oC. Generally, H_c of $CoCrTa_5$ is higher than that of $CoCrTa_2$. Contrary to the behavior of H_c, c-axis orientation of $CoCrTa_2$ samples was found to be better than that of $CoCrTa_5$ samples. To get an optimum material, suitable for making magnetic recording media, we suggested that Ta content should be in between 2 and 5 at.% to compromise the two contrary trends as mentioned above and T_s should be about 150 to 200^oC.

Chapter 6 began with the study of single Cr layers on different types of substrates and under different sputtering conditions, in order to find a way to control and to optimize the texture of the Cr layer. A substrate temperature T_s of about $200 - 250^oC$ was found to create a Cr film (100 nm-thick) with both (110) and (200) textures. High T_s promotes the (200) texture, whereas at low T_s, only Cr(110) exists. Varying Cr film thickness, we found that 100 nm-thick film has comparably strong (110) and (200) textures. Argon pressure has equal effects on both textures, and it was found to be optimum at 3×10^{-2} mbar.

In the next step, we deposited CoCrTa layer of various thicknesses on a Cr underlayer of fixed thickness. Measurements of in-plane coercivity and other parameters suggested that 20 nm is the optimum thickness for CoCrTa layer. Angular dependence of coercivity and hysteresis loss of the samples has been studied. Comparison between the measurements and theories of reversal mechanisms indicates that the magnetization of the samples switches mainly by incoherent rotation mode. There is a tendency to change from incoherent to coherent rotation when CoCrTa thickness is reduced.

Finally, we deposited a CoCrTa layer of fixed thickness onto a Cr underlayer of various thicknesses. Plane-view TEM images show that grain size increases with increasing Cr underlayer thickness. From the cross-sectional images, it was found that the samples have a clear columnar structure. Concerning magnetic properties, we observed that the in-plane coercivity increases abruptly when the Cr underlayer is introduced and tends to be saturated when the Cr layer is about 50 nm thick. The squareness S and the in-plane anisotropy constant were found to peak at about 45-75 nm. This suggested that a Cr underlayer of thickness in this range is considered the optimum thickness for longitudinal recording. Moreover, from the initial susceptibility measurements and angular dependence of coercivity and hysteresis loss, we found that the sample without an underlayer switches by domain wall motion mode. When the Cr underlayer is introduced, the reversal mode changes to incoherent and tends to move to coherent mode in samples having thick Cr underlayer.

Chapter 7 was devoted to the time-dependence effect in three types of recording media, namely, CoCrTa/Cr in-plane media, perpendicular alumite media and CoCrTa single layer media.

Experimental results on CoCrTa/Cr in-plane media showed that their magnetic viscosity exhibits a peak near H_{cr}. There is a close correlation between the width of the peak and SFD. Activation volumes around H_c were found to be close to the physical volumes of the grains. From the fitting results, the nature of the viscosity curve has been suggested. Based on these results, we were able to understand the factors which affect the shape of the viscosity curves. The switching volume, which is a fitting parameter of the fit, was found to be close to the measured activation volume around H_c and the physical volume of the grains. This suggested that the switching mechanism of the samples is probably incoherent or partly coherent rotation.

Viscosity curves of perpendicular alumite media, however, were found to have different shapes than in-plane media. Viscosity values exhibit a plateau at low applied field and then decreases with the field. After correction for the demagnetizing effect, the shape of the viscosity curves similar to that of in-plane media is recovered. Fitting results for these alumite samples revealed that the model only accepts a switching volume which is much smaller than the activation volume and the physical volume of the sample. The reversal mechanism of the samples is supposed to be curling and it tends toward coherent rotation when the thickness is reduced.

CoCrTa single layer media were studied in the last part of the chapter. The samples are considered perpendicular media because their c-axis orientation is mainly perpendicular. The viscosity curves of the samples have similar shape as those of alumite media. We found that the value of viscosity at low field (at the plateau) increases almost linearly with increasing H_c. The switching volumes found from the fit are close to the activation volumes, however, they are several times smaller than the physical volumes of the grains. This indicates that the reversal mechanism of the samples is incoherent.

Cursus aankondigingen

- DE SENIOREN AKADEMIE GRONINGEN EN DRENTHE

(RU-Groningen) organiseert een cursus *'Geschiedenis der Natuurwetenschappen. Capita selecta Electriciteit-Magnetisme-Electromagnetisme 1600-1925'.*

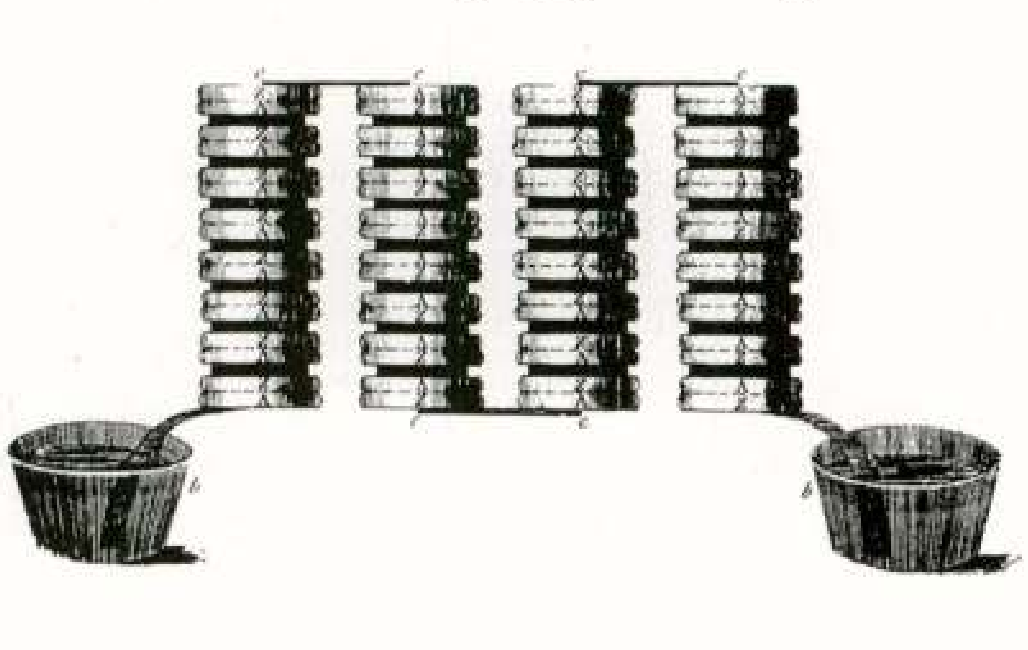
De cursus markeert de 200ste verjaardag van de uitvinding van de 'zuil' (=3D batterij) door Alessandro Volta. Zij beoogt een overzicht te geven van de theoretische, experimentele en technologische ontwikkeling op natuur-wetenschappelijk terrein, vanaf het verschijnen van de verhandeling 'De magnete' van William Gilbert (1600) t/m het vierde Solvay-congres (1924).

Het accent ligt op electriciteit en magnetisme en hun 'unificatie' in het electromagnetisme. Bijzondere aandacht wordt besteed aan de gebruikte opstellingen en apparatuur en de latere toepassingen daarvan.

De cursus bestaat uit hoor- en werkcolleges aan de hand van een geïllustreerde syllabus met oorspronkelijke teksten (inclusief vertaling) van coryfeeën als Gilbert, Descartes, Franklin, Coulomb, Volta, Ampère, Faraday, Maxwell en Lorentz.

Docent: Dr. H.H. Kubbinga (Groningen, Luik).
Tijd: de donderdagen 27 januari t/m 6 april 2000 (10 x 4 uur).
Plaats: RU-Groningen.
Kosten: *f* 350 (exclusief syllabus).
Inlichtingen (folder + inschrijvingsformulier): tel.050-3636597 of 0591-647878.
Uiterste inschrijfdatum: 13 januari 2000.

Contactadres: Dr. Henk Kubbinga
University of Groningen, Faculty of Philosophy
A-weg 30, 9718 CW Groningen
Tel: ..-31.50.3636161 (private: ..-31.50.5735609)
Fax: ..-31.50.3636160
E-mail: H.H.Kubbinga@philos.rug.nl



- TOPTECH STUDIES TU DELFT

Starting for the 12th time in January 2000: postgraduate programme 'Master of Business Telecommunications'
website: www.toptech.tudelft.nl

DONATEURS VAN HET NEDERLANDS ELEKTRONICA- EN RADIOGENOOTSCHAP

ALCATEL ALCATEL Nederland BV Postbus 3292 2280 GG Rijswijk	NKF KABEL NKF KABEL B.V. Postbus 26 2600 MC Delft
ERICSSON Ericsson Telecommunicatie B.V. Postbus 8 5120 AA Rijen	PHILIPS Natuurkundig Laboratorium Postbus 80.000 5600 JA Eindhoven
HEWLETT® PACKARD Hewlett-Packard Nederland B.V. Postbus 667 1180 AR Amstelveen	ROHDE & SCHWARZ Nederland B.V. Postbus 1315 3430 BH Nieuwegein
SIGNAAL Hollandse Signaalapparaten BV Postbus 42 7550 GD Hengelo	SIEMENS Siemens Nederland N.V. Postbus 16068 2500 BB 's Gravenhage
kpn research Postbus 421 2260 AK Leidschendam	Telpro+ Telecommunicatie Telpro plus BV Postbus 9433 1006 AK Amsterdam
LIBERTEL Libertel BV Postbus 1500 6201 BM Maastricht	TNO TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium Postbus 96864 2509 JG 's Gravenhage
Lucent Technologies Bell Labs Innovations Lucent Technologies Postbus 1168 1200 BD Hilversum	Stichting Wetenschappelijk Radiofonds Veder Rotterdam
PHILIPS Philips Business Communications Postbus 32 1200 JD Hilversum	*Verder in de elektrotechniek* VEV/ELEKTROTECHNISCH VAKONDERWIJS Postbus 275, 3860 AG Nijkerk

Druk: Drukkerij Van Ek, Driebergen